

**PLANEJAMENTO A LONGO PRAZO PARA USO SUSTENTÁVEL  
DA RESERVA LEGAL EM PEQUENAS PROPRIEDADES**

**TEREZA RACHEL MAFIOLETI**

**PLANEJAMENTO À LONGO PRAZO PARA USO SUSTENTÁVEL  
DA RESERVA LEGAL EM PEQUENAS PROPRIEDADES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, área de concentração em Programação Matemática, Departamento de Construção Civil, Setor de Tecnologia e Departamento de Matemática, Setor de Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Ciências,

Orientador: Prof. Dr. Arinei Carlos Lindbeck da Silva  
Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ângela Olandoski Barboza.

CURITIBA  
2010

**TERMO DE APROVAÇÃO**

TEREZA RACHEL MAFIOLETI

**PLANEJAMENTO A LONGO PRAZO PARA USO SUSTENTÁVEL  
DA RESERVA LEGAL EM PEQUENAS PROPRIEDADES**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no curso de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Departamento de Construção Civil, Setor de Tecnologia e Departamento de Matemática, Setor de Ciências Exatas, da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Arinei Carlos Lindbeck da Silva  
Departamento de Matemática, UFPR

\_\_\_\_\_  
Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Ângela Olandoski Barboza  
Departamento de Matemática, UTFPR

\_\_\_\_\_  
Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Dayse Regina Batistus  
Departamento de Matemática, UTFPR

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Júlio Eduardo Arce  
Departamento de Engenharia Florestal, UFPR

Curitiba, 19 de agosto de 2010.

Ao meu amigo, Espírito Santo  
À minha amiga, Daniana de Costa

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que esteve comigo durante a realização deste sonho, que me abençoou com a vida, com dons, dedicação, paciência e financeiramente para chegar ao final deste trabalho com êxito.

Agradeço a minha família. A minha irmã Camila Cristina Mafioleti que sempre fez a manutenção no computador que utilizei, levou-me na rodoviária, e foi muito companheira ouvindo pacientemente os meus relatos a cada momento de construção desse trabalho. E ao meu pai, Vanderlei Carlinhos Mafioleti por me ajudar na escolha e compra do notebook e por ter abaixado o volume do som enquanto estudava.

À todos os professores do PPGMNE, principalmente o professor Celso Carnieri, por ter conseguido alguma referência bibliográfica e por ter escolhido o melhor orientador para mim.

Agradeço ao meu orientador, Arinei Carlos Lindbeck da Silva, porque o seu auxílio foi fundamental para a definição do tema do trabalho e para a construção do modelo matemático. Também sou grata por ter escolhido a melhor co-orientadora.

Sou grata à minha co-orientadora, Ângela Olandoski Barboza por toda dedicação, disposição, boa vontade, ânimo e horas que seriam de descanso que empregou na correção desse trabalho. Também, pelas dicas de formatação e ensinamentos a respeito da escrita dos modelos matemáticos.

Ao Engenheiro Florestal Filipe Marcel Vargas pela coleta dos dados, pelo apoio nas questões legais e florestais, pelas sugestões que enriqueceram o modelo matemático, pela disposição e disponibilidade, e por todo o tempo que dedicou.

Agradeço ao IAPAR pela acessibilidade que permitiu-me ter contato com assuntos florestais, o que foi de suma importância para a definição do tema do trabalho.

Agradeço ao professor José Donizetti de Lima (UTFPR – Pato Branco) por ter despertado meu interesse na procura de assuntos relacionados à agricultura e questões do campo e me incentivado a procurar o IAPAR – Instituto Agrônômico do Paraná.

Sou grata à Francielle Zancanaro Weschenfelder (UTFPR – Pato Branco) por ter sido APLI (Apoio na Linguagem Inglesa), e pelos demais auxílios prestados, dentre outros, pela disponibilidade de sua carteirinha da biblioteca nos momentos em que precisei. Por toda boa vontade e disposição, por ser tão querida. *Thank you so much!*

Agradeço à Universidade Federal Tecnológica do Paraná (UTFPR), campus Pato Branco, pelo auxílio com as bibliografias, espaço de estudo, biblioteca e por ter possibilitado

que eu conhecesse boa parte dos professores(as) que prestaram auxílio e deram direção à este trabalho. Também, por ter me empregado durante boa parte do curso de mestrado, prestando assim, apoio financeiro necessário.

Agradeço aos meus colegas de mestrado, em especial à Divanete Maria Bitdinger de Oliveira, Dulcelina Gustmann, Franklin Ângelo Krukroski, Josimar de Mattos, Sheila Regina Oro, e Patrícia Pazetto, por compartilharem das mesmas alegrias, preocupações, listas de exercícios, lanches, bifés, entre outros durante todo o período em que foi cursado o mestrado. Também por todo auxílio, caronas, disposição e boa vontade, enfim, pelo ombro amigo.

Gostaria também de agradecer algumas pessoas que me hospedaram em suas casas, a cada nova viagem para cursar os créditos e para as orientações desta dissertação: Emanoeli da Rosa Bombardelli, Luciana Bárbara Seben, Maria Dallago.

Agradeço a Marieli Musial Tumelero e Gilson Tumelero por trazerem ao meu conhecimento o PPGMNE – Programa de Pós Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, por me incentivarem com material de estudo, e por me hospedarem em sua casa alguns finais de semana em que cursei os créditos.

Agradeço aos professores da Coordenação de Eletrônica (COELE), da UTFPR, campus Pato Branco, em especial o Mário Lúcio da Silva Martins, Fábio Brignol de Moraes e José Paulo de Barros Neto por terem me incentivado no uso do MATLAB para auxílio às disciplinas que eu lecionava, ainda no tempo em que cursava os créditos do mestrado. Eles me apresentaram uma ferramenta que ainda utilizarei por longa data. Também sou grata à professora Gislene Salim Rodrigues por todo o apoio e incentivo.

Agradeço aos professores da Coordenação de Matemática (COMAT) da UTFPR. Principalmente à Luz Delícia Castillo Vila Lobos e Fredy Domingos Soares que acreditaram no sonho, dos quais eu obtive a indicação para cursar o mestrado. E, em especial ao professor Luiz Carlos Scheitt, por me apresentar a Pesquisa Operacional ainda no tempo de graduação. Também à professora Dayse Regina Batistus por todo o incentivo.

Gostaria de agradecer à CPM-Braxis S.A., meu antigo emprego, empresa onde eu tive o primeiro contato com a programação, me empregou durante o início dos créditos e me auxiliou muito na minha formação.

Também agradeço aos colegas do terceiro ano da graduação pois juntos, iniciamos a sonhar um sonho que é concretizado com a defesa dessa dissertação. Muito obrigado à todos os que me animaram e incentivaram a dar um passo além.

Sou grata à todos os que direta ou indiretamente contribuíram à realização deste trabalho, dentre eles, o CESEQ, a Maristela Bandil, professor Volmir, professora Neida,

Thober Detofeno, entre outros que pode ser que eu nem me lembre no momento. Alguns não sabem que o fizeram, como por exemplo, a viação Princesa dos Campos, o e-mail do Gmail, a GVT, a URBS, entre outros sem os quais não teria concluído mais esta etapa.

Mais uma vez: muito obrigado!

“Aquele que nem mesmo a seu próprio Filho poupou, mas o entregou por nós, como não nos dará também com Ele todas as coisas?” Romanos 8, 32

“Mas a graça foi dada a cada um de nós segundo a medida do dom de Cristo” Efésios 4,7

“Bem aventurado o homem que acha sabedoria, o homem que adquire conhecimento; porque melhor é a sua mercadoria do que a mercadoria de prata, e a sua renda do que o ouro mais fino. Mais preciosa é que os rubis, e tudo o que podes desejar não se pode comparar a ela. Aumento de dias há na sua mão direita, e na sua esquerda riquezas e honra. Os seus caminhos são caminhos de delícias, e todas as suas veredas, paz. É árvore da vida para os que a seguram, e bem aventurado são todos os que a retêm. O Senhor com sabedoria fundou a terra; preparou os céus com inteligência. Pelo seu conhecimento se fenderam os abismos, e as nuvens destilam o orvalho.” Provérbios 1, 13-20



## RESUMO

A imposição das Legislações Federal e Estadual quanto à área de Reserva Legal em todas as propriedades rurais do Brasil é favorável à conservação do meio ambiente, porém traz consigo a diminuição de áreas das quais advém lucros, dentre elas lavouras e pastagens. Os agricultores familiares que têm nas atividades agrícolas a sua maior fonte de renda são prejudicados com parte de sua propriedade destinada à Reserva Legal. A lei não exime o pequeno proprietário da responsabilidade de implantação da Reserva Legal, porém garante alternativas de manejo para uso sustentável da área. Buscando estas alternativas, neste trabalho foram simulados sistemas de manejo para um período de 30 anos. Nestas simulações procurou-se atender as restrições impostas pela Lei e os planejamentos de maior Valor Presente Líquido (*VPL*). Um modelo matemático de Programação Linear Inteira Mista foi estruturado usando-se informações referentes ao problema. Foram respeitadas restrições referentes às Leis que regem a Reserva Legal e também as restrições técnicas específicas para a região em estudo. Os modelos foram desenvolvidos para o sudoeste do Paraná. Nestes modelos foram testados diferentes regimes de manejos e respectivos fluxos de caixa a fim de contemplar diversas situações. Para tanto, foi desenvolvido um *software* no aplicativo MATLAB para a redação dos modelos que foram então resolvidos pelo aplicativo LINGO. Cada solução foi organizada em cenários e incluiu os seguintes aspectos do problema: ocupação da área da Reserva Legal, quantidade de mudas por hectare, fluxo de caixa no período de planejamento, anos de plantios, desbastes e colheitas. Estes cenários foram estruturados com o auxílio do *Microsoft Excel* e estimaram a situação da Reserva Legal em cada um dos períodos do planejamento. Três casos distintos quanto à quantidade de espécies exigidas pelo modelo no decorrer dos períodos de planejamento foram simulados. Após a comparação e análise das alternativas viáveis concluiu-se que os sistemas que apresentaram maiores *VPL's* foram os que permitiam que metade da área da Reserva Legal fosse ocupada por uma única espécie. Com relação aos aplicativos computacionais utilizados, observou-se que o *software* implementado no MATLAB mostrou-se eficaz para redigir os modelos, pois automatizou o esforço despendido para o cálculo de alguns dos parâmetros. Também permitiu redigir modelos com período inicial no ano atual ou nos anos seguintes, possibilitando um estudo mais amplo a sobre a viabilidade econômica na implantação dos sistemas de manejo florestal para uso sustentável da área de Reserva Legal. Finalmente, pode-se observar que o aplicativo LINGO resolveu os modelos de forma eficiente em tempo computacional aceitável.

**Palavras-chave:** Reserva Legal, Programação Linear Inteira Mista, Planejamento do Manejo Florestal.

## ABSTRACT

The imposition of Federal and State Laws regarding the Legal Area Reserve on all farming areas in Brazil is favorable to environmental conservation, but it brings itself the decrease of areas which ones profits come from, among them crops and pastures. The agricultural families that have in agricultural activities their main source of income are affected when part of their property are for Legal Reserve. The Law doesn't absolve the smallholder from the responsibility of implementing the Legal Reserve, but it ensures alternatives of handling for sustainable use of the area. Seeking these alternatives, this study simulated handling systems for a period of 30 years. In these simulations they were tried to fulfill the restrictions imposed by Law and the planning of higher Net Present Value (NPV). A mathematical model of Integer Mixed Linear Programming was structured using information about the problem. They were respected restrictions relating to the Laws that regulate the Legal Reserve, and also the specific technical restriction in the region under study. The models were developed to studies in the southwest region of Paraná. In these models were tested several handling systems and their cash flows to contemplate several situations. In order to accomplish it, a software application was developed in MATLAB for the writing of the models that were later solved by LINGO application. Each solution was organized in scenarios and it included the following aspects of the problem: the occupation of the Legal Area Reserve, number of seedlings per hectare, cash flow in the planning period, years of plantation, thinning and harvest. These scenarios were structured with Microsoft Excel assistance and they estimated the situation of Legal Reserve in each period of planning. Three different cases regarding the number of required species by the model during the planning periods were simulated. After comparison and analysis of feasible alternatives it was concluded that the systems that had got higher NPV's were those that allowed the half area of Legal Reserve was occupied by a single species. Regarding to computer applications used, it was observed that the software implemented in MATLAB was effective to writing models because it automated the spent effort for the calculation of some parameters. It also allowed to write models with initial period in the current year or in following years, allowing a broad study about the economic feasibility on the introduction of the forest handling systems for sustainable use of the Legal Area Reserve. Finally, it is possible to notice that the Lingo applicative solved the models in an efficiently way within an acceptable computational time.

**Keywords:** Legal Reserve, Integer Mixed Linear Programming, Forest Handling Planning.

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1: TABELA CANÔNICA .....	31
QUADRO 2: REGIMES DE MANEJO FLORESTAL.....	79
QUADRO 3: SISTEMAS DE MANEJO DO MODELO PILOTO .....	89
QUADRO 4: FLUXOS DE CAIXA DO EXEMPLO PILOTO.....	90
QUADRO 5: CICLOS ECONÔMICOS DAS ESPÉCIES NA RESERVA LEGAL .....	98
QUADRO 6: PORCENTAGEM DA ÁREA OCUPADA POR PERÍODO.....	98
QUADRO 7: FLUXOS DE CAIXA DOS REGIMES DE MANEJO DA SOLUÇÃO DO MODELO.....	99
QUADRO 8: VALOR PRESENTE POR ESPÉCIE E POR PERÍODO DE PLANEJAMENTO.....	100
QUADRO 9: VALOR PRESENTE POR PERÍODO DE PLANEJAMENTO .....	100
QUADRO 10: QUANTIDADE DE PLANTAS/HA DE CADA ESPÉCIE SOB REGIMES SELECIONADOS .....	101
QUADRO 11: QUANTIDADE DE PLANTAS POR PERÍODO EM UM HECTARE.....	102
QUADRO 12: PORCENTAGEM DE ÁREA DESTINADA A CADA ESPÉCIE PELAS SOLUÇÕES .....	103
QUADRO 13: PERÍODO INICIAL DA ESPÉCIE NA ÁREA DE RESERVA LEGAL ....	104
QUADRO 14: RESUMO DAS SOLUÇÕES DOS MODELOS .....	105
QUADRO 15: FLUXO DE CAIXA NOS PERÍODOS DE PLANEJAMENTO .....	114
QUADRO 16: VALOR PRESENTE POR PERÍODO DE PLANEJAMENTO .....	114
QUADRO 17: CICLOS ECONÔMICOS DAS ESPÉCIES NA RESERVA LEGAL .....	115
QUADRO 18: PORCENTAGEM DA ÁREA OCUPADA POR PERÍODO.....	115
QUADRO 19: QUANTIDADE DE PLANTAS POR PERÍODO EM UM HECTARE.....	116
QUADRO 20: FLUXO DE CAIXA NOS PERÍODOS DE PLANEJAMENTO .....	117
QUADRO 21: VALOR PRESENTE POR PERÍODO DE PLANEJAMENTO .....	117
QUADRO 22: CICLOS ECONÔMICOS DAS ESPÉCIES NA RESERVA LEGAL .....	118
QUADRO 23: PORCENTAGEM DA ÁREA OCUPADA POR PERÍODO.....	118
QUADRO 24: QUANTIDADE DE PLANTAS EM UM HECTARE POR PERÍODO.....	119
QUADRO 25: FLUXOS DE CAIXA PARA TODAS AS ESPÉCIES E REGIMES DE MANEJO.....	121
QUADRO 26: NÚMERO DE PLANTAS PARA TODAS AS ESPÉCIES E REGIMES DE MANEJO.....	123

**LISTA DE FIGURAS**

FIGURA 1: DIAGRAMA DA RESOLUÇÃO PELO ALGORITMO <i>BRANCH &amp; BOUND</i>	44
FIGURA 2: FUSTE .....	71
FIGURA 3: FORMATOS DOS FUSTES.....	71

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	16
1.1. OBJETIVOS	18
1.1.1. Objetivo geral	18
1.1.2. Objetivos específicos	18
1.2. JUSTIFICATIVA	18
1.3. LIMITAÇÕES	19
1.4. ESTRUTURA	19
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	21
2.1. PESQUISA OPERACIONAL	21
2.1.1. Formulação do problema	23
2.1.2. Construção do modelo do sistema	24
2.1.3. Cálculo da solução através do modelo	24
2.1.4. Teste do modelo e da solução	25
2.1.5. Estabelecimento de controles da solução	25
2.1.6. Implementação e acompanhamento	25
2.2. MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR	26
2.3. MÉTODO SIMPLEX	28
2.3.1. Modelo na forma padrão	28
2.3.2. Tabela canônica	31
2.3.3. Resolução do modelo	32
2.4. O PROBLEMA DUAL	35
2.5. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	37
2.5.1. Variação dos coeficientes da função objetivo	38
2.5.2. Variações nas constantes das restrições	38
2.5.3. Variações nos coeficientes das variáveis das restrições	39
2.5.4. Eliminação ou acréscimo ou de uma variável	40
2.5.5. Acréscimo ou eliminação de uma restrição	41
2.6. PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA	41
2.6.1. Algoritmo <i>Branch and Bound</i>	42
2.6.2. Algoritmo de Corte de <i>Gomory</i>	44
2.7. PROGRAMAÇÃO LINEAR BINÁRIA	45
<b>3. REVISÃO DE LITERATURA</b>	46
3.1. PLANEJAMENTO FLORESTAL	46
3.2. MODELO I DE JOHNSON E SCHEURMAN	47
3.2.1. Função objetivo	48
3.2.2. Restrições	51
3.2.3. Algumas aplicações	53
3.3. MODELO II DE JOHNSON E SCHEURMAN	53
3.3.1. Função objetivo	54
3.3.2. Restrições	55
3.3.3. Algumas aplicações	56
3.4. OUTROS MÉTODOS PARA A OTIMIZAÇÃO DO MANEJO FLORESTAL	57
<b>4. A LEGISLAÇÃO DA RESERVA FLORESTAL LEGAL</b>	61
4.1. ÁREA DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE	61
4.2. ÁREA DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE E ÁREA DE RESERVA LEGAL	62
4.3. ÁREA DE RESERVA LEGAL	62
4.4. RECUPERAÇÃO DA ÁREA DE RESERVA LEGAL	63

4.4.1. Compensação da área de Reserva Legal.....	63
4.4.2. Condução da regeneração natural.....	64
4.4.3. Manejo sustentável da área de Reserva Legal.....	65
4.4.3.1. Como proceder o manejo sustentável .....	65
4.4.3.2. Colheita e transporte de produtos florestais da área de Reserva Legal.....	66
<b>5. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>69</b>
5.1. DADOS PARA O MODELO .....	69
5.1.1. Espécies .....	70
5.1.1.1. Eucalipto – <i>Eucalyptus grandis</i> .....	72
5.1.1.2. Nogueira – <i>Carya illinoensis</i> .....	73
5.1.1.3. Bracatinga – <i>Mimosa scabrella</i> .....	73
5.1.1.4. Louro – <i>Cordia trichotoma</i> .....	73
5.1.1.5. Erva-mate – <i>Ilex paraguariensis</i> .....	74
5.1.1.6. Araucária – <i>Araucária angustifolia</i> .....	74
5.1.1.7. Jabuticaba – <i>Myrciaria cauliflora</i> .....	75
5.1.1.8. Goiabeira serrana – <i>Acca sellowiana</i> .....	75
5.1.1.9. Louro-branco – <i>Bastardiopsis densiflora</i> .....	75
5.1.1.10. Imbuia – <i>Ocotea porosa</i> .....	76
5.1.1.11. Canela-preta – <i>Ocotea catharinensis</i> .....	76
5.1.1.12. Angico-branco – <i>Anadenanthera colubrina</i> .....	77
5.1.1.13. Canela-branca – <i>Nectandra lanceolata</i> .....	77
5.1.1.14. Maricá – <i>Mimosa bimucronata</i> .....	77
5.1.1.15. Canjarana – <i>Cabralea canjerana</i> .....	78
5.1.1.16. Grápia – <i>Apuleia leiocarpa</i> .....	78
5.2. MODELAGEM.....	80
5.2.1. Função objetivo.....	81
5.2.2. Restrições .....	81
<b>6. IMPLEMENTAÇÃO .....</b>	<b>86</b>
6.1. CONSTRUÇÃO DO MODELO.....	86
6.1.1. Dados de entrada do programa.....	86
6.1.1.1. Matrizes.....	86
6.1.1.2. Vetores .....	87
6.1.1.3. Escalares.....	87
6.1.2. Cálculos preliminares .....	88
6.1.2.1. Matrizes.....	88
6.1.2.2. Escalares.....	89
6.1.3. Exemplo de um modelo piloto .....	89
6.1.3.1. Dados de entrada.....	90
6.1.3.1.1. Matrizes .....	90
6.1.3.1.2. Vetores.....	90
6.1.3.1.3. Escalares .....	91
6.1.3.2. Obtenção dos demais parâmetros do modelo .....	91
6.2. RESOLUÇÃO DO MODELO .....	95
6.3. ESTRUTURAÇÃO DOS RESULTADOS .....	95
<b>7. RESULTADOS E CONCLUSÕES .....</b>	<b>96</b>
7.1. RESULTADOS.....	96
7.1.1. Análise dos resultados .....	106
7.2. CONCLUSÕES.....	107
7.2.1. Sugestões para trabalhos futuros .....	107
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>109</b>

<b>APÊNDICES .....</b>	<b>113</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>120</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Embora a Reserva Legal seja um assunto muito discutido atualmente, uma área com a sua importância em cada propriedade foi desejada desde longa data. Um dos primeiros documentos no qual ela é citada é o Decreto nº 23.793 formulado pelo presidente Epitácio Pessoa, datado em 23 de janeiro de 1934 e conhecido como Código Florestal de 34. No seu art. 23 é descrito que nenhum proprietário de terras cobertas de matas poderia abater mais de três quartos (75%) da vegetação existente. As pequenas propriedades isoladas e próximas de florestas ou situadas em zona urbana estariam isentas, porém o Decreto não define o tamanho de uma propriedade para que ela seja considerada pequena. Caberia à autoridade competente determinar qual parte da área (25%) não deveria ser desmatada, isso após o proprietário manifestar a sua intenção, 30 dias antes do desmatamento. A punição pelo não cumprimento da lei seria detenção até 60 dias e multa de dez milhões de réis. O aproveitamento de árvores mortas ou secas da floresta remanescente, seria proibido, e quem o fizesse teria que replantar imediatamente com vegetal da mesma espécie ou outra adequada às condições locais. A exploração dessa área seria limitada e restrita as operações autorizadas pelo Ministério da Agricultura com observância dos dispositivos do Decreto.

Na Lei nº 4.771 de 15 de setembro de 1965, ou Código Florestal, em vigor atualmente, a Reserva Legal é descrita no art. 16 como sendo 20% das propriedades rurais em qualquer região do país, desconsiderando os casos em que estejam situadas na Amazônia Legal. O Código não descreve a isenção da Reserva Legal para as pequenas propriedades, e as define como sendo aquela explorada mediante o trabalho pessoal do proprietário ou posseiro e de sua família, admitida a ajuda eventual de terceiro e cuja renda bruta seja proveniente, no mínimo em 80%, de atividade agroflorestal ou do extrativismo, cuja área não supere 30 hectares, localizada em qualquer região do país. A legislação estadual do Paraná define pequena propriedade da mesma forma, porém, considera que sua área não supere 50 hectares. O Código Florestal Nacional afirma que a localização da área de Reserva Legal deve ser aprovada pelo órgão ambiental estadual ou municipal.

Diferente do ocorrido na década de 30, as propriedades hoje, em sua maioria, já estão totalmente desmatadas e ocupadas por plantações. A colheita proveniente da área que pode ser destinada à Reserva Legal obrigatória representa um lucro significativo para o pequeno



proprietário e a sua ausência vem a causar prejuízo. Considerando isso, vê-se que a Lei não deixa desamparado o agricultor que tem na terra a sua principal fonte de subsistência. Ainda que não exista permissão para que a Reserva Legal seja suprimida, é proposto que ela seja utilizada sob regime de manejo florestal sustentável. Para o cumprimento da manutenção ou compensação da área de Reserva Legal em pequena propriedade ou posse rural familiar, podem ser computados os plantios de árvores frutíferas ornamentais ou industriais, compostos por espécies exóticas, cultivadas em sistema intercalar ou em consórcio com espécies nativas. Tal alternativa para as pequenas propriedades foi estabelecida pela Medida Provisória nº 2.166-67 de 2001.

Alguns questionamentos poderiam surgir a respeito da necessidade de uma área com mata nativa, onde o ecossistema natural é “reconstruído” como é o caso da Reserva Legal. A questão que está em discussão não é apenas o cumprimento de uma Lei. Estudiosos como Daily (1997, p. 3) afirmam que em tais ecossistemas ocorrem ciclos naturais conduzidos pela energia solar que existem de forma similar há pelo menos cem milhões de anos, além dos seres que nele habitam, ambos necessários para a sustentabilidade da vida humana. A Medida Provisória nº 1.956-50/00, define a Reserva Legal e destaca a sua importância: área localizada no interior de uma propriedade ou posse rural, excetuada a de preservação permanente, necessária ao uso sustentável dos recursos naturais, à conservação e a reabilitação dos processos ecológicos, à conservação da biodiversidade e ao abrigo e proteção de fauna e flora nativas.

A Instrução Normativa nº 4 de 8 de setembro de 2009 define o manejo florestal da Reserva Legal da seguinte forma: técnicas de condução, exploração e reposição praticadas de forma sustentável visando manter a proteção e o uso sustentável da vegetação nativa e obter benefícios econômicos, sociais, ambientais, respeitando-se os mecanismos de sustentação do ecossistema objeto do manejo e considerando-se, cumulativa ou alternativamente, a utilização de múltiplos produtos e subprodutos, bem como a utilização de outros bens e serviços ambientais. Nota-se a possibilidade da obtenção de lucros a partir do manejo florestal da Reserva Legal. Dadas algumas espécies naturais da região em que está a Reserva, é preciso determinar aquelas que além de gerar maior lucratividade, reconstituam o ecossistema considerando as restrições biológicas. Espécies florestais em geral, possuem a característica de serem passíveis de inclusão apenas em sistemas de produção de longo prazo, com o período de início de produção variando, desde o ano 3, como a Erva-mate (*Ilex paraguariensis*), ao ano 15 no caso do Louro-pardo (*Cordia trichotoma*). Tendo em vista

estas e várias outras restrições impostas por lei, faz-se necessária a determinação de um plano de manejo sustentável da área de Reserva Legal.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo geral

Apresentar um modelo de Programação Linear que descreva a situação da área de Reserva Legal das pequenas propriedades do sudoeste do Paraná considerando as restrições impostas pela lei e pelas espécies. O objetivo da modelagem deve ser maximizar o valor presente líquido dado o total de períodos de planejamento.

### 1.1.2. Objetivos específicos

Conhecidos os parâmetros referentes às espécies nativas e exóticas do sudoeste do Paraná, seus regimes de manejo e respectivos fluxos de caixa, elaborar modelos matemáticos da área de Reserva Legal condizentes com a realidade da região.

Implementar computacionalmente os modelos com auxílio de *softwares*, tais como o aplicativo MATLAB para a redação dos modelos, o aplicativo LINGO para obtenção de soluções dos mesmos, e o aplicativo *Microsoft Excel* para análise dos resultados.

Apresentar algumas soluções detalhadamente, a fim de apontar alguns planos de manejo sustentáveis interessantes, principalmente a solução do modelo que obtiver o maior *VPL*.

## 1.2. JUSTIFICATIVA

Muito se tem discutido a respeito das limitações que a legislação florestal impõe aos agricultores, através da diminuição da área de lavouras e pastagens devido à necessidade de áreas de preservação permanente e de Reserva Legal. Porém, o debate sobre as oportunidades que a área de Reserva Legal coloca ao agricultor, não tem acontecido.

A execução dos objetivos propostos será útil aos proprietários de pequenas propriedades do sudoeste do Paraná. Os resultados obtidos permitirão a elaboração de planos

de manejos sustentáveis que garantam uma renda – necessária à subsistência sua e de seus familiares - respeitando as condições impostas por Lei para área de Reserva Legal.

### 1.3. LIMITAÇÕES

Como a área de reserva legal é composta por espécies nativas ou exóticas, as curvas de crescimento de algumas das espécies são desconhecidas. Isto implica não saber ao certo qual o volume de madeira será colhido a cada desbaste e então, não há certeza dos lucros obtidos com a venda do produto. Portanto, foram utilizadas estimativas para tais valores.

O planejamento do manejo sustentável é de longo prazo. Os valores dos insumos, mão de obra, maquinário necessário, além dos valores de venda do mercado entre outros, são alterados frequentemente. Os coeficientes da função objetivo do modelo que correspondem ao lucro líquido foram calculados com base em valores do início do ano de 2010. Portanto, o valor da função objetivo é um valor aproximado do real.

### 1.4. ESTRUTURA

O primeiro capítulo discute o assunto tema do trabalho, apresentando previamente o problema para o qual serão propostas soluções.

O segundo capítulo trata da Pesquisa Operacional com algumas de suas modelagens matemáticas, ferramentas que serão utilizadas para a obtenção de soluções para o problema.

No terceiro capítulo é feita uma revisão bibliográfica e são apresentados trabalhos de alguns autores que utilizaram a Pesquisa Operacional com suas modelagens na resolução de problemas da área florestal. Também são apresentadas outras alternativas para a obtenção de soluções além das apontadas pela Pesquisa Operacional.

O quarto capítulo descreve a área de Reserva Legal mais detalhadamente, bem como as Leis que a regem. Também apresenta a metodologia utilizada, especificando as fórmulas para a construção dos modelos propostos neste trabalho.

O quinto capítulo refere-se a materiais e métodos utilizados, apresentando a modelagem do sistema de manejo florestal.

O sexto capítulo relata a implementação computacional.

O sétimo, aponta as respostas obtidas pelo aplicativo computacional LINGO, compara as soluções, e apresenta alguns planos de manejo sustentável convenientes.

Finalizando, o sétimo capítulo contém as conclusões e sugestões para possíveis trabalhos futuros.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse capítulo, a Pesquisa Operacional será apresentada e também a formulação de um modelo de Programação Linear (PL), necessário para entendimento dos demais modelos de Programação Matemática. Em seguida, serão discutidas maneiras de obtenção de soluções a partir do modelo, usando-se o algoritmo simplex. Na sequência, será discutido o dual para o modelo apresentado e sua importância. Pequenas alterações nos dados conhecidos ou estimados para a formulação do modelo serão estudadas através da análise de sensibilidade. Finalmente, serão discutidos alguns modelos mais específicos de Programação Matemática, tais como Programação Linear Inteira e Programação Linear Binária.

### 2.1. PESQUISA OPERACIONAL

De acordo com Caixeta-Filho (2004), o desenvolvimento da Pesquisa Operacional (PO) deve-se principalmente à equipe de cientistas liderada pelo norte americano George B. Dantzig, convocada pelos aliados da Segunda Guerra Mundial no início da década de 40, para oferecer subsídios técnicos para as tomadas de decisões que envolvessem a distribuição ótima de tropas entre as concorrentes frentes de batalha. O resultado deste esforço de pesquisa foi publicado posteriormente (Dantzig, 1963) e recebeu o nome de Método Simplex.

Hillier e Lieberman (1988) explicam que por causa da guerra, foi necessário alocar recursos escassos a operações militares de forma eficaz. Para tal, a chefia militar inglesa e a americana recrutaram vários cientistas para que fizessem uma pesquisa sobre operações militares e então utilizassem métodos científicos. Estas foram as primeiras equipes de Pesquisa Operacional. O interesse dos cientistas envolvidos foi crescente ao final da guerra.

A Pesquisa Operacional utiliza-se de Modelos Matemáticos de programação. De acordo com Hillier e Lieberman (1988), a palavra “programação” é sinônimo de planejamento, e não de programação de computadores, como alguns podem pensar. E o termo “linear” deve-se ao fato de que todas as equações, inequações e funções matemáticas do modelo são lineares. Devido aos avanços tecnológicos, muitos dos modelos de programação, tais como Programação Linear, Programação Dinâmica, teoria das filas e teoria de estoque, foram bem desenvolvidos antes do final dos anos 50.

Arenales et al.(2007) relatam grupos de Pesquisa Operacional e eventos ao longo dos anos:

- Em 1947, projeto SCOOP (*Scientific Computation of Optimal Programs*) no Pentágono, para apoiar decisões de operações na força aérea americana;
- Em 1952, a Sociedade Científica Americana de Pesquisa Operacional (ORSA – *Operations Research Society of America*);
- Em 1953, a Sociedade Inglesa de Pesquisa Operacional (ORS – *Operational Resarch Society*);
- Em 1953, a Sociedade Americana de Ciências e Administração (TIMS – *The Institute of Management Sciences*);
- Em 1957, a primeira conferência internacional de Pesquisa Operacional na Inglaterra, em Oxford;
- Em 1967 foram identificados 766 grupos de Pesquisa Operacional, nos setores industrial, econômico, financeiro, militar, em instituições públicas e privadas.

Ainda citaram que exemplos de aplicações no setor público envolviam coleta de lixo, transporte e polícia, entre outros. Desde então, a Pesquisa Operacional tem sido aplicada às mais diversas áreas de produção e logística, incluindo indústrias de alimentação, automóveis, aviação, computadores, eletrônica, metalurgia, mineração, mísseis, móveis, papel, petróleo, telecomunicações, transportes; além de organizações de serviço (públicas e privadas), como: bancos e seguradoras, hospitais, bibliotecas, sistemas judiciais, agências de viagens e turismo, energia, esportes, trânsito, agências de governo (federais, estaduais, municipais) etc.

São descritas por Arenales et al. (2007) várias sociedades científicas de estudo de Pesquisa Operacional na atualidade:

- ORS na Inglaterra;
- INFORMS (*Institute for Operations Research and Management Science*) nos Estados Unidos agregando as sociedades anteriores ORSA e TIMS;
- GOR (*German Research Society*) na Alemanha;
- CORS (*Canadian Operations Research Society*) no Canadá;
- APDIO (Associação Portuguesa de Investigação Operacional) em Portugal;
- SOBRAPO (Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional) no Brasil;
- ALIO (*Asociación Latino-Ibero-Americana de Investigación Operativa*) composto por doze sociedades científicas;

- EURO (Associação das Sociedades de Pesquisa Operacional da Europa) composto por 29 sociedades científicas;
- APORS (Associação das Sociedades de Pesquisa Operacional da Ásia e do Pacífico) composto por dez sociedades científicas;
- NORAM (Associação das Sociedades de Pesquisa Operacional da América do Norte);
- IFORS (*International Federation of Operational Research Societies*) que entre sociedades nacionais e grupos regionais, conta com 52 membros.

Uma das principais funções da Pesquisa Operacional segundo Andrade (2004) é apontar uma solução ótima viável para um problema proposto que envolva várias variáveis e condições a serem satisfeitas. Ele explica que a qualidade de uma decisão é avaliada pela satisfação dos interesses envolvidos, adaptação dos meios necessários ao alcance dos objetivos e consistência do curso de ação. Aqui, Pesquisa Operacional é definida como a arte de aplicar técnicas de modelagem a problemas de tomada de decisão, e resolver modelos identificados por meio de métodos matemáticos e estatísticos visando a obtenção de uma solução ótima, sob uma abordagem sistêmica.

Alguns problemas para os quais a Pesquisa Operacional pode auxiliar no processo de tomada de decisão são evidenciados por Lachtermacher (2007): problemas de otimização de recursos, de localização, de roteirização, de carteiras de investimento, de alocação de pessoas, e de previsão de planejamento.

A implementação de métodos de Pesquisa Operacional é realizada com a sucessão dos seguintes passos, mostrados por Silva et al. (1998): formulação do problema, construção do modelo do sistema, cálculo da solução através do modelo, teste do modelo e da solução, estabelecimento de controles da solução, implementação e acompanhamento. São esses seis passos que serão tratados a seguir.

### **2.1.1. Formulação do problema**

Lachtermacher (2007) afirma que um problema ocorre quando o estado atual de uma situação é diferente do estado desejado. A descrição da situação atual é o que a maioria dos autores chama de sistema.

Na observação de um problema, o responsável pelo sistema pode valer-se de ferramentas de Pesquisa Operacional na busca por uma solução. Para a formulação do problema, Andrade (2004) destaca três aspectos que devem ser considerados: descrição exata dos objetivos de estudo, identificação das alternativas de decisão existentes, e por fim,

reconhecimento das limitações, das restrições e das exigências do sistema. Nas restrições do problema, é importante considerar as relações do sistema com outros sistemas da empresa ou do ambiente externo, a fim de que uma solução ótima apontada para o modelo seja de implementação viável.

### **2.1.2. Construção do modelo do sistema**

Arenales et al. (2007) afirmam que a Pesquisa Operacional e, em particular, a Programação Matemática tratam de problemas de decisão e faz uso de modelos matemáticos que procuram representar (em certo sentido, imitar) o problema real. Variáveis (incógnitas) são definidas e relações matemáticas entre essas variáveis são estabelecidas de forma a descrever o comportamento do sistema.

De acordo com Silva et al.(1998), as variáveis podem ser controladas ou não controladas. Variáveis controladas são aquelas cujo valor pode ser alterado pelo responsável do sistema. As não controladas são as que o responsável do sistema não pode controlar, como por exemplo, o custo de produção. Os modelos que interessam em Pesquisa Operacional são os Modelos Matemáticos, isto é, modelos formados por um conjunto de equações e inequações. Uma das equações do conjunto serve para medir a eficiência do sistema para cada solução proposta e é chamada de função objetivo ou função de eficiência. As outras equações e inequações geralmente descrevem as limitações ou restrições técnicas do sistema.

### **2.1.3. Cálculo da solução através do modelo**

A construção do modelo deve levar em consideração a disponibilidade de uma técnica para o cálculo da solução. Dentre as técnicas diferenciadas para resolução de cada tipo de problema de Pesquisa Operacional, está o algoritmo simplex, muito utilizado em problemas de Programação Linear.

Inevitavelmente, problemas de Programação Matemática irão implicar em programação computacional, pois na prática, pode-se ter um número de variáveis de decisão elevado, afirmam Goldbarg et al. (2000). Felizmente, existem *softwares* que possuem métodos de resolução implementados e são capazes de encontrar solução para os modelos. Em especial, podem ser citados *Solvers* do Excel, o aplicativo comercial LINGO, o aplicativo CPLEX, o aplicativo MOSEK e o aplicativo GAMS.



#### **2.1.4. Teste do modelo e da solução**

A validação do modelo implica em verificar se o modelo é satisfatório, ou seja se consegue representar o sistema real com certo grau de precisão. Esse fato é explicado por Andrade (2004): Um modelo é válido se, a despeito da sua inexatidão em representar o sistema, ele for capaz de fornecer uma previsão aceitável do comportamento do sistema e uma resposta que possa contribuir para a qualidade da decisão a ser tomada. Ele ainda sugere que dados históricos do sistema sejam utilizados para verificar se o modelo consegue dar uma resposta próxima ao comportamento que o sistema manifestou.

Percebe-se então, que testar o modelo implica em avaliar-se a solução do mesmo. Neste caso, vale observar que o profissional mais indicado para tal é o responsável pelo sistema. Lachtermacher (2007) expõe que o número elevado de informações para certos problemas, atualmente, pode gerar mais variáveis que o necessário para o modelo. Sendo assim, em caso de solução insatisfatória, o responsável pelo sistema, com sua intuição e experiência, deve verificar se a retirada ou a inclusão de algumas variáveis tornam a solução apresentada aceitável, a fim de validar o modelo.

#### **2.1.5. Estabelecimento de controles da solução**

Silva et al.(1998), explica que devem ser observados quais os dados que exercem maior influência sobre a solução apontada pelo modelo. Geralmente, esses dados serão coeficientes das variáveis da restrição ou da função objetivo. O autor chama a atenção para o fato de considerar desvios além do previsto para esses dados, e então calcular nova solução. Caso seja necessário, o modelo deverá ser reformulado, tomando-se as devidas providências para que seja validado.

#### **2.1.6. Implementação e acompanhamento**

Após a obtenção de um modelo válido, a implementação implica na interpretação da solução encontrada pelo *software* na resolução do Modelo Matemático. A partir desta interpretação, deve-se reconhecer as atitudes a serem tomadas sobre o sistema real para então ajustar o modelo (ARENALES et al., 2007).

Ainda, depois de encontrada a solução, a observação do sistema deve ser feita para verificar se a resposta obtida para o modelo está de acordo com o proposto pelos objetivos

estabelecidos na formulação do problema. O modelo sempre é passível de alteração, e cada parte do processo deve passar por devida avaliação (ANDRADE, 2004).

## 2.2. MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR

O modelo de Programação Linear, de acordo com Goldbarg et al.(2000) é o modelo básico para a compreensão dos demais modelos da Programação Matemática.

Para que um problema possa ser modelado com a Programação Linear é necessário que as grandezas envolvidas obedeçam a aditividade, a proporcionalidade, e o fracionamento. Arenales et al. (2007) explica estas propriedades a seguir:

**Hipótese de Aditividade:** o todo é igual a soma das partes. Por exemplo, se em 1 kg do ingrediente  $j$  encontramos 200 g (ou 0,2 kg) do componente  $i$  e, em 1 kg do ingrediente  $k$ , encontramos 100 g do mesmo componente, então a mistura de 2 kg, obtida pela adição de 1 kg de cada ingrediente  $j$  e  $k$ , tem 300g do componente  $i$ . Cabe alertar que, apesar de esse comportamento ser comum, são muitas as aplicações práticas em que isso não acontece ou pode ser negligenciado.

**Hipótese de Proporcionalidade:** pressupõe que, se  $a_{ij}$  é a quantidade do componente  $i$  em uma quantidade do ingrediente  $j$ , então  $a_{ij}x_j$  será a quantidade do componente  $i$  em  $x_j$  unidades; se uma unidade do ingrediente  $j$  custa  $c_j$ , então  $x_j$  unidades custam  $c_jx_j$ . Por exemplo, se 1 kg de um ingrediente contém 200 g de um componente, então 1/2 kg deste ingrediente contém 100 g do componente, assim como 3kg contém 600 g.

Hadley (1982) destaca que a linearidade implícita em um problema de Programação Linear apesar de não ser sempre a representação absoluta do mundo real, apresenta uma aproximação suficientemente precisa das condições reais fornecendo assim resultados aplicáveis.

**Hipótese de Fracionamento:** as variáveis podem assumir valores fracionários, ou seja, a solução para o modelo será dada em valores no conjunto dos números reais. Para os casos em que algumas variáveis não possam assumir valores fracionários, será utilizada a Programação Linear Inteira, assunto a ser abordado adiante.

**Hipótese de Não-negatividade:** muitos autores defendem que os valores possíveis para as variáveis não devem ser negativos, porém, em alguns casos, algumas variáveis poderão

assumir valor negativo. Nesse caso serão chamadas irrestritas no sinal, conforme citam Hillier e Lieberman (1988).

Para iniciar o modelo, deve-se definir o objetivo do mesmo, que, de acordo com Puccini (1972), pode ser, por exemplo, a maximização de lucros, ou a minimização de custos. Tal objetivo é expresso por uma função linear, definida da seguinte forma por Goldbarg et al. (2000):

$$\text{Otimizar } z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (2.1)$$

$N = \{1, 2, \dots, n\}$  é o conjunto dos índices das variáveis;

$x = (x_j)$ , é o vetor coluna de  $n$  componentes,  $j \in N$ ; e

$c = (c_j)$ , é o vetor linha de  $n$  componentes,  $j \in N$ .

Tal expressão pode ser escrita da forma:

$$z = c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3 + \dots + c_k x_k + \dots + c_n x_n \quad (2.2)$$

Após estabelecido o objetivo, é necessário que o modelo descreva a situação real do sistema, considerando quais são as limitações existentes para a obtenção do objetivo. Puccini (1972) explica que essas informações fornecidas por equações e inequações lineares são as restrições do modelo, onde uma delas pode ser dada por exemplo, pela descrição das atividades que consomem cada recurso e em que proporção esse consumo é feito.

A expressão que caracteriza as restrições, encontrada na maioria das citações bibliográficas é “sujeito a”. Em seguida vem as restrições que Goldbarg et al. (2000) descreve da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j &\geq d_i \quad i = 1, 2, \dots, p \\ \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j &= d_i \quad i = p+1, p+2, \dots, m \\ x_j &\geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, q \\ x_j &\in \mathfrak{R} \quad j = q+1, q+2, \dots, n \end{aligned} \quad (2.3)$$

onde  $M = \{1, 2, \dots, m\}$  é o conjunto dos índices das restrições do problema;

$A = (a_{ij})_{m \times n}$  é a matriz das restrições de  $m$  linhas e  $n$  colunas;

$a_{ij}$  é a  $j$ -ésima coluna de  $A$ ;

$d = (d_i)$ ,  $i \in M$  é o vetor coluna de  $m$  componentes.

Hillier e Lieberman (1988) explicam que as seguintes alterações no modelo acima implicam ainda em um modelo de Programação Linear:

- A função objetivo, que visa otimização, pode ser tanto para maximizar o valor de  $z$  quanto para minimizar;
- As restrições, além de serem igualdades ou desigualdades com sinal de maior ou igual, podem ser desigualdades com sinal de menor ou igual;
- A restrição de não-negatividade para algumas variáveis pode ser eliminada, e elas poderão ser então, irrestritas no sinal.

Uma vez construído o modelo, será estudado um método para a obtenção de uma solução, chamado Método Simplex.

## 2.3. MÉTODO SIMPLEX

De acordo com Murty (1976), problemas de Programação Linear só podem ser solucionados por meio de algoritmos, um processo de passos que leva a uma resposta para o problema em um número finito de passos. O algoritmo de maior sucesso para a resolução de problemas de Programação Linear é o algoritmo simplex desenvolvido por George B. Dantzig, ou alguma de suas muitas variações.

Murty (1976) ainda descreve em sua obra, que a aplicação do método simplex se dá pela execução das seguintes ações: colocar o modelo na forma padrão; montar uma tabela com os coeficientes das restrições e da função objetivo e aplicar sobre essa tabela operações elementares de álgebra. Ao final, as variáveis do problema distinguem-se em básicas e não básicas, e então é possível obter uma solução ótima, ou pelo menos viável. Por vezes é necessário estabelecer um critério de parada para as operações elementares de álgebra. Essas ações serão discutidas posteriormente.

### 2.3.1. Modelo na forma padrão

Um modelo na forma padrão é aquele em que todas as restrições são equações e todas as variáveis são não negativas.

Um problema com  $n$  variáveis pode apresentar restrições das formas

$$\begin{aligned}
a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n &\leq b_i \\
a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n &\geq b_i \\
a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n &= b_i
\end{aligned} \tag{2.4}$$

Hadley (1982) observa que os valores  $b_i$  podem ter qualquer sinal, mas, para a formulação do problema padrão, eles devem ser positivos. Se os coeficientes  $b_i$  forem negativos, então multiplicando-se as restrições por  $(-1)$ , obtém-se as restrições:

$$\begin{aligned}
-a_{i1}x_1 - a_{i2}x_2 - \dots - a_{in}x_n &\geq -b_i \\
-a_{i1}x_1 - a_{i2}x_2 - \dots - a_{in}x_n &\leq -b_i \\
-a_{i1}x_1 - a_{i2}x_2 - \dots - a_{in}x_n &= -b_i
\end{aligned} \tag{2.5}$$

Alterados os sinais, Hadley (1982) também explica como obter equações a partir das inequações do modelo. Tal ação permite transformar o sistema mediante algumas operações que não causam alteração no conjunto de soluções viáveis. As operações utilizadas para transformar o sistema são:

- Multiplicar todos os coeficientes em ambos os lados de uma equação por qualquer número diferente de zero.
- Multiplicar uma equação por um número real e adicioná-la a outra equação.

Restrições da forma  $\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j = b_i$ , não têm necessidade de alteração, por já serem equações.

Para restrições do tipo  $\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \leq b_i$ , deve-se adicionar uma variável  $x_{n+1}$ , de valor ainda desconhecido. Essa variável correspondente ao valor que “falta” para  $\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j$  tornar-se igual a  $b_i$  e é conhecida como variável de folga. Assim, obtém-se a equação:

$$\left( \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \right) + x_{n+1} = b_i \tag{2.6}$$

Para restrições do tipo  $\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \geq b_i$ , o raciocínio é análogo, porém, ao invés de acrescentar uma variável  $x_{n+1}$  a  $\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j$ , deve-se subtrair. Tal variável  $x_{n+2}$  corresponde a

quantidade que  $b_i$  excede  $\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j$ , e é conhecida como variável de “excesso”. A restrição ficará da forma:

$$\left( \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \right) - x_{n+2} = b_i \quad (2.7)$$

As variáveis de folga e de excesso, de acordo com Murty (1976) devem assumir sempre valores não negativos.

Obtidas as equações para restrições do modelo, deve-se então preocupar-se com os possíveis valores para as variáveis, que para a forma padrão devem ser todas não negativas. As variáveis que deverão ser transformadas são as irrestritas, ou seja, que admitem valores negativos. Dada a variável  $x_k$  de sinal irrestrito, Arenales et al. (2007), sugere substituí-la pela diferença de duas variáveis  $x_k^+$  e  $x_k^-$ , tal que estas sejam não negativas. Isto implicaria na substituição de  $x_k$  por  $x_k = x_k^+ - x_k^-$ , na função objetivo e em todas as restrições do modelo. Assim, o modelo sofreria acréscimo de uma variável.

Outra forma de contornar a irrestrição de uma variável  $x_k$ , é explicada por Murty (1976), que sugere que a variável  $x_k$  seja isolada em uma das restrições que já tenha sido alterada para igualdade, obtendo assim:

$$x_k = \frac{(b_i - a_{i1}x_1 - a_{i2}x_2 - \dots - a_{i,k-1}x_{k-1} - a_{i,k+1}x_{k+1} - \dots - a_{in}x_n)}{a_{ik}} \quad (2.8)$$

Depois  $x_k$  deve ser substituído na função objetivo e em todas as restrições. Dessa forma o modelo ficaria com uma variável a menos, pois  $x_k$  seria eliminada, e também com uma restrição a menos, aquela na qual  $x_k$  foi isolada. Ao final da resolução, o valor de  $x_k$  é encontrado substituindo-se os valores obtidos para as demais variáveis na equação em que  $x_k$  foi isolado.

Após os ajustes com relação as restrições e as variáveis, faz-se a construção de uma tabela denominada canônica.

### 2.3.2. Tabela canônica

Se o problema possui apenas restrições do tipo menor ou igual e tem os coeficientes  $b_i \geq 0$ , então seu modelo, com  $n$  variáveis,  $m$  restrições e  $m$  variáveis de folga (uma para cada restrição), é apresentado na forma padrão como:

$$\begin{aligned}
 &\text{Otimizar } z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n + 0x_{n+1} + 0x_{n+2} + 0x_{n+3} + \dots + 0x_{n+m} \\
 &\text{Sujeito a } \begin{aligned}
 &a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n + x_{n+1} + 0x_{n+2} + 0x_{n+3} + \dots + 0x_{n+m} = b_1 \\
 &a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n + 0x_{n+1} + x_{n+2} + 0x_{n+3} + \dots + 0x_{n+m} = b_2 \\
 &a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + \dots + a_{3n}x_n + 0x_{n+1} + 0x_{n+2} + x_{n+3} + \dots + 0x_{n+m} = b_3 \\
 &\dots \\
 &a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n + 0x_{n+1} + 0x_{n+2} + 0x_{n+3} + \dots + x_{n+m} = b_m
 \end{aligned} \\
 &x_j \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m+n
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

Uma solução inicial pode ser encontrada atribuindo-se os valores  $b_1, b_2, \dots, b_m$  para as variáveis de folga  $x_{n+1}, x_{n+2}, x_{n+3}, \dots, x_{n+m}$  respectivamente, e zero para as demais variáveis. Observe que para esta solução o valor da função objetivo é nulo, pois os coeficientes das variáveis de folga na função objetivo são nulos. Murty (1976) explica que as variáveis de folga  $x_{n+1}, x_{n+2}, x_{n+3}, \dots, x_{n+m}$ , por serem as variáveis que recebem valor, são chamadas de básicas e dizemos que elas formam uma base para o sistema, enquanto as demais variáveis são chamadas não básicas. De acordo com Puccini (1972), um sistema como este está na forma canônica porque apresenta as seguintes características: todas as variáveis são não negativas, todos os  $b_i$  são não negativos, e tem uma base óbvia.

Dado o sistema na forma canônica é possível então obter a tabela canônica:

var. básica	$x_1$	$\dots$	$x_n$	$x_{n+1}$	$x_{n+2}$	$\dots$	$x_{n+m}$	$\bar{b}$
$x_{n+1}$	$a_{11}$	$\dots$	$a_{1n}$	1	0	$\dots$	0	$b_1$
$x_{n+2}$	$a_{21}$	$\dots$	$a_{2n}$	0	1	$\dots$	0	$b_2$
$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$
$x_{n+m}$	$a_{m1}$	$\dots$	$a_{mn}$	0	0	$\dots$	1	$b_m$
$z$	$c_1$	$\dots$	$c_n$	0	0	$\dots$	0	0

QUADRO 1: TABELA CANÔNICA

FONTE: BARTOSIEVICZ (2008)

A primeira linha da tabela contém todas as variáveis do problema e a última linha, corresponde aos coeficientes da função objetivo. As linhas intermediárias são os coeficientes das equações das restrições. Na primeira coluna são posicionadas as variáveis básicas, que para a tabela inicial, são dadas pelas variáveis de folga, conforme anteriormente explicado. A última coluna corresponde ao vetor  $b$  e é nessa coluna que ficam armazenados os valores para as variáveis a cada nova solução apontada pelo método. Na última linha e última coluna, encontra-se o valor da função objetivo  $z$ . Esta tabela está na forma canônica, pois Murty (1976), explica que uma tabela está na forma canônica se for possível extrair-se uma matriz identidade de ordem  $m$  por  $m$  das linhas e colunas dos coeficientes das variáveis depois de o modelo ter sido escrito na forma padrão. Vale lembrar que os valores do vetor  $b$  deverão ser não negativos.

Construída a tabela, pode-se então aplicar a sequência de passos descrita pelo algoritmo simplex na busca por uma solução ótima.

### 2.3.3. Resolução do modelo

Dada a tabela canônica, como visto anteriormente, a solução inicial é dada por uma base composta pelas variáveis de folga e o valor da função objetivo é nulo, tanto para o problema de minimização quanto para o de maximização. O algoritmo consiste na alteração das variáveis básicas e não básicas, e conseqüentes ajustes no valor da função objetivo. Para o problema de minimização, Bronson (1985) descreve os seguintes passos:

**Passo 1:** Encontrar o número mais negativo na linha da função objetivo, excluída a última coluna. A variável da primeira linha da tabela, da coluna escolhida, é a que entrará na base. Em caso de empate para um número mais negativo, qualquer um deles deverá ser escolhido.

**Passo 2:** Para determinar quem deverá sair da base, deve-se formar quocientes da divisão de cada número da última coluna pelo número positivo da linha correspondente da coluna da variável que entrará na base, excluindo a última linha da função objetivo. Escolha para pivô o elemento da coluna que gera o menor quociente não negativo. Em caso de empate no quociente, escolha qualquer um. Se nenhum elemento da coluna for positivo, o valor da função objetivo será ilimitado inferiormente, tenderá a  $-\infty$ , e deve-se ir para o Passo 6.

**Passo 3:** Para que a variável escolhida entre na base, é preciso que o elemento pivô seja transformado em 1 e os demais valores da coluna da variável sejam iguais a zero, para que a tabela seja mantida na forma canônica. Para atualização da tabela utilizam-se as seguintes operações elementares:



- multiplicar uma linha inteira por um valor diferente de zero;
- multiplicar os coeficientes de uma linha inteira por um valor diferente de zero e adicionar aos de uma outra linha.

O novo sistema gerado é equivalente ao sistema no qual foram realizadas as operações.

**Passo 4:** A primeira coluna da tabela, referente as variáveis que estão na base deve ser alterada. A variável que está na linha do elemento pivô escolhido no Passo 2, deve ser substituída pela variável que está na coluna do elemento pivô. Assim, obtém-se uma nova solução e um novo conjunto de variáveis básicas.

**Passo 5:** A presença de coeficientes negativos na função objetivo indica que o valor de  $z$  pode ainda diminuir quando for atribuído algum valor à variável de tal coeficiente. Isso indica que tal variável deve entrar na base, e então os Passos de 1 a 4 devem ser repetidos até a inexistência de números negativos na última linha, excluindo a última coluna, que corresponde ao valor da função objetivo.

**Passo 6:** A solução ótima é obtida atribuindo à cada variável da base, que está na primeira coluna, o valor da linha correspondente da última coluna. As variáveis não básicas recebem valor zero. O valor da função objetivo fica na última linha, última coluna, e deve-se tomar o inverso aditivo deste número.

Se a função objetivo for de maximizar, os seis passos acima ainda serão válidos desde que seja feita a seguinte adequação, explicada por Puccini (1972):

**Passo 1:** Tomar o maior valor positivo na linha da função objetivo, excluindo o valor da função objetivo.

**Passo 2:** Proceder da mesma forma, porém, se nenhum elemento da coluna pivô for positivo, então o valor da função objetivo é ilimitado superiormente, ou seja, divergirá para  $+\infty$ .

**Passo 3:** Não se altera.

**Passo 4:** Não se altera.

**Passo 5:** Se ainda existirem coeficientes positivos na função objetivo, os Passos de 1 a 4 deverão ser repetidos, e o processo deverá encerrar quando os valores da última linha, exceto o da última coluna forem todos negativos.

**Passo 6:** Não se altera.

Um problema de maximização, pode ser transformado em um problema de minimização. Arenales et al. (2007) explica que multiplicando todos os coeficientes da função objetivo por  $(-1)$ , maximizar  $z$  torna-se equivalente a minimizar  $-z$  e então os passos descritos para obter a solução do problema de minimização podem ser aplicados.

No Passo 2, quando ocorre empate para a escolha da variável que deverá sair da base e deve-se escolher uma arbitrariamente, tem-se que a variável não escolhida assumirá valor zero. Quando isso acontece com uma variável da base, diz-se que a mesma é degenerada. Depois de assumir valor nulo, pode ser que esta ainda seja a melhor candidata a entrar na base, porém, o valor da função objetivo não será alterado. Neste caso, a resolução do problema deve ser encerrada, pois, pode-se entrar em um circuito fechado e interminável à procura da solução ótima (PUCCINI, 1972).

Nos casos em que é necessária a inclusão de uma variável de excesso, a forma canônica para o sistema não é atingida, pois sendo o coeficiente desta variável igual a -1, então não é possível obter a matriz identidade de que falou Murty (1976). O mesmo ocorre se a restrição for de igualdade, e não for necessária a inclusão de nenhuma variável. A linha correspondente a essa restrição não fará parte da matriz identidade da tabela, e assim não será possível obter a forma canônica.

Lachtermacher (2007) denomina essa situação de inconsistente. Sugere, para contornar esse problema, o método de duas fases descrito a seguir:

**Fase I:** Serve para retirar as inconsistências, ou seja, para obter uma tabela na forma canônica para o problema. Deve-se fazer a inclusão de uma variável com o coeficiente +1 em cada restrição de igualdade e do tipo maior ou igual. Para o quadro obtido, essas variáveis, chamadas de artificiais, estarão na base assumindo valores do vetor  $b$ . Para que o novo sistema seja equivalente ao anterior, é necessário que as variáveis artificiais tenham valor nulo. Para conseguir isso, deve-se trocar a função objetivo por minimizar o somatório das variáveis artificiais. Como tais variáveis só assumem valores não negativos, o menor valor para elas é zero, ou seja, elas deverão sair da base e dar lugar a outras variáveis do problema original. Após a resolução pelos seis passos do algoritmo simplex, se estas variáveis não saírem da base, considera-se o problema sem solução. Caso contrário, deve-se prosseguir para a Fase II.

**Fase II:** Assim que todas as variáveis artificiais tiverem saído da base, após assumirem valor nulo, obtém-se a tabela na forma canônica onde as variáveis básicas são as do problema original, e neste momento as variáveis artificiais podem ser retiradas do quadro. A função objetivo de minimizar o somatório das variáveis artificiais deve ser trocada pela função objetivo do problema original. Então, deve-se proceder à resolução pelo algoritmo simplex e obter a solução para o problema.

## 2.4. O PROBLEMA DUAL

O modelo de Programação Linear da forma como foi apresentado é chamado de primal. Para cada problema na forma primal, existe um problema na forma dual. Lachtermacher (2007) aponta algumas razões para o estudo do problema na forma dual. A primeira e mais importante são as interpretações econômicas que podemos obter dos valores das variáveis do Dual na solução ótima, tais como variações marginais. A segunda está ligada ao número de restrições. Computacionalmente falando é, algumas vezes, mais eficiente resolver o problema dual (dependendo do número de restrições e de variáveis) do que o primal correspondente, já que, obtendo a solução ótima de um, estaremos obtendo a solução ótima do outro.

Os problemas dual e primal são equivalentes, conforme explica Murty (1976), e afirma que para a transformação do primal em dual, o primal deverá obedecer as condições:

- se for de maximizar, então as restrições deverão ser igualdade ou do tipo menor ou igual;
- se for de minimizar, então as restrições deverão ser de igualdade ou do tipo maior ou igual.

É válido lembrar que para inverter o sinal de desigualdade de uma restrição basta multiplicar seus coeficientes por (-1).

Organizado o problema primal, Puccini (1972) explica que para obter o dual deve-se proceder da seguinte forma:

- a) Se a função objetivo do primal for de maximização, a do dual será de minimização e vice-versa;
- b) Os termos constantes das restrições do primal são os coeficientes da função objetivo do dual, logo o número de incógnitas do dual é igual ao número de restrições do primal;
- c) Para cada variável do primal, ocorre uma restrição no dual, em que o termo constante é o coeficiente da função objetivo do primal, logo o número de restrições do dual é igual ao número de incógnitas do primal;
- d) A matriz dos coeficientes do dual é a transposta da matriz dos coeficientes do primal;
- e) Se as restrições do primal forem do tipo menor ou igual, as do dual serão do tipo maior ou igual e vice-versa;

- f) Para as restrições do primal que forem de igualdade, a variável associada no dual será de sinal irrestrito;
- g) Se a variável do primal for de sinal irrestrito, a restrição do dual correspondente à ela terá sinal de igualdade.

Puccini (1972) escreve os modelos primal e dual da seguinte forma:

### Primal

$$\begin{aligned} \text{Maximizar } z &= \sum_{j=1}^n c_j x_j \\ \text{Sujeito a } \quad &\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \quad i = 1, 2, \dots, m \\ &x_j \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (2.10)$$

### Dual

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } d &= \sum_{i=1}^m b_i y_i \\ \text{Sujeito a } \quad &\sum_{i=1}^m a_{ij} y_i \leq c_j \quad j = 1, 2, \dots, n \\ &y_i \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (2.11)$$

Dados dois problemas (primal e dual), Murty (1976) define que um é dual do outro, e que o dual do dual é o primal.

Com respeito aos valores da função objetivo, Lachtermacher (2007) afirma:

- Se um dos problemas tiver solução viável e sua função objetivo for limitada (portanto, tiver uma solução ótima), então, o outro também terá, e a solução ótima para ambos será igual;
- Se um dos problemas tiver soluções viáveis, porém uma função objetivo ilimitada (portanto, sem solução ótima), então o outro não terá soluções viáveis;
- Se um dos problemas não tiver solução viável, então o outro não terá soluções viáveis, ou terá soluções ilimitadas.

Ainda, Lachtermacher (2007) explica como se dá a interpretação econômica do problema dual:

As variáveis originais do problema dual são chamadas de diversas maneiras, dentre as quais podemos citar Preço-Sombra (Shadow Price) e Valor Implícito. As variáveis originais ( $y_i$ ) do problema dual que estão associadas à variáveis de folga/excesso

introduzidas nas restrições do problema primal representam economicamente o valor marginal do recurso da restrição  $i$  em relação ao valor da função objetivo, isto é, o valor pelo qual a função objetivo seria alterada, caso a quantidade do recurso  $i$  (representada pela constante da restrição  $b_i$ ) fosse aumentada em uma unidade.

Diante do exposto, conclui-se que quando a variável de folga no primal é diferente de zero, nem todo o recurso da restrição está sendo utilizado, e por isso, o custo marginal que é a variável do problema dual associada a tal restrição deve ser zero. Se a variável de folga do primal for nula, quer dizer que todo o recurso está sendo utilizado, então o custo marginal, dado pela variável do dual associada a tal restrição deverá ser maior que zero.

Vale ressaltar que os *softwares* para resolução de problemas de Programação Linear calculam os valores para o problema primal e também apresentam os valores das variáveis do dual.

## 2.5. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Ao modelar o problema, supõe-se que os parâmetros (coeficientes da função objetivo e das restrições e os valores do vetor  $b$ ) são constantes conhecidas e imutáveis. Hillier e Lieberman (1988), explicam que na realidade não é isso que ocorre, porque na maioria das vezes os parâmetros são estimados com base numa previsão de condições futuras, com dados geralmente crus ou inexistentes. Assim, os autores afirmam que uma solução será ótima se permanecer sendo ótima para variações do modelo. Saber o quanto os parâmetros podem variar para que tal solução permaneça ótima, estabelece um grau de confiabilidade na utilização e implementação dos resultados.

Hillier e Lieberman (1988) afirmam que por estas razões é importante se proceder uma análise de sensibilidade para investigar o efeito do método simplex sobre a solução ótima se os parâmetros assumirem outros valores possíveis. Por isso o objetivo básico da análise de sensibilidade é identificar os parâmetros particularmente sensíveis, para que possa ser tomado um cuidado especial na estimativa mais aproximada deles e na seleção de uma nova solução que tenha um bom desempenho para a maioria de seus valores.

De acordo com Andrade (2004), os seguintes casos podem ser estudados numa análise de sensibilidade: variação nos coeficientes da função objetivo, variações nas constantes das restrições, variações nos coeficientes das variáveis das restrições, eliminação ou acréscimo de uma variável, acréscimo ou eliminação de uma restrição. Por vezes, alterar

um dos parâmetros do modelo não torna necessário voltar à tabela canônica inicial e desenvolver novamente os passos do simplex. Pode-se partir do quadro final que descreveu a solução ótima.

### **2.5.1. Variação dos coeficientes da função objetivo.**

Dois casos podem ocorrer: o coeficiente a se alterar ser de uma variável não básica, ou de uma variável básica.

Se o coeficiente é de uma variável não básica o problema é de minimização, e a alteração inclui um coeficiente negativo, então a função objetivo pode reduzir seu valor. Logo, a variável alterada entrará na base. Da mesma forma, se o problema for de maximização, e o novo coeficiente gerado for positivo, isso implica que o valor da função objetivo pode aumentar se tal variável entrar na base. Para esses casos, deve-se colocar a variável na base e continuar as iterações do método simplex.

Com relação à alteração do coeficiente de uma variável básica, Puccini (1972) explica que a linha referente à função objetivo no quadro final do simplex deve ser recalculada tomando-se o valor que se deseja que seja adicionado ao coeficiente, multiplicando-se pela linha em que a variável é básica (linha em que a variável aparece na primeira coluna) e somando-se com a linha da função objetivo. Se o problema for de minimizar e surgirem valores negativos, ou se o problema for de maximizar e surgirem valores positivos, então deve-se continuar a resolução pelo algoritmo simplex, gerando uma nova base. Caso não ocorra mudança no sinal dos valores da função objetivo, a solução permanece ótima, embora o valor de  $z$  possa não permanecer o mesmo.

### **2.5.2. Variações nas constantes das restrições.**

Ehrlich (1988) faz as seguintes considerações:

- O aumento em alguma das constantes  $b_j$  quando há variável de folga na base, aumenta o valor da folga mas não altera a solução ótima.
- O decréscimo de alguma das constantes  $b_j$  onde há variável de folga na base, se não exceder o valor da variável de folga, não altera a solução.

- Quando há mudanças em alguma das constantes  $b_j$  e não há folga, é necessário calcular todos os valores das constantes  $b_j$  na tabela final, para então verificar se há valor negativo, o que indicaria inviabilidade.

Para saber se os valores de todas as constantes  $b_j$  na tabela final são não negativos, Murty (1976) sugere o seguinte procedimento. Se a variação em alguma  $b_j$  for dada por  $\Delta b_j$ , então o vetor  $b$  na tabela final da fórmula será dado por:

$$b_{final} = B^{-1}(b_1, \dots, b_j + \Delta b_j, \dots, b_m)^T \quad (2.12)$$

onde  $B^{-1}$  é a matriz formada pelas colunas das variáveis que estão na base na solução apontada pelo simplex.

Fazendo  $b_{final} \geq 0$  serão obtidas  $m$  inequações com restrição do tipo “ $\geq 0$ ” com a variável  $\Delta b_j$  que determinarão intervalos para  $\Delta b_j$ . A interseção desses intervalos determina um intervalo final para o qual a solução do simplex é viável. Assim os valores que  $\Delta b_j$  pode assumir são encontrados, ou seja, os possíveis valores de variação para algum parâmetro  $b_j$ .

### 2.5.3. Variações nos coeficientes das variáveis das restrições.

Será considerada a alteração do coeficiente em uma única variável de cada vez e são possíveis dois casos de acordo com a variável: básica e não básica.

No caso de variável não básica, a coluna referente a ela deverá ser recalculada. Observa-se então se tal variável entrará na base. Goldbarg et al. (2000) explica como é possível atualizar uma coluna. Se  $a_{ijnova}$ ,  $i = 1, \dots, m$  for o vetor dos coeficientes alterados da variável  $x_j$  dada, para algum  $j$ , então, a coluna das restrições atualizada é dada por

$$B^{-1}a_{ijnova} \quad (2.13)$$

onde  $B$  é a matriz inversa cujas colunas são os valores abaixo das variáveis básicas na tabela inicial, dada pelos coeficientes das restrições.

Se  $c_j$  for o valor inicial de uma unidade de  $x_j$  na função objetivo, o seu valor atualizado  $c_{jnov}$  será dado por

$$c_{jnovo} = c_B B^{-1} a_{ijnova} - c_j \quad (2.14)$$

onde  $c_B$  são os coeficientes das variáveis básicas na tabela inicial.

Se o problema for de minimização e  $c_{jnovo}$  for negativo, ou o problema for de maximização e  $c_{jnovo}$  for positivo, então a variável cujo coeficiente foi alterado, deverá entrar na base, dando continuidade ao algoritmo simplex.

Agora, se uma variável básica tem os seus coeficientes nas restrições alterados, Murty (1976) sugere que uma nova coluna para a variável seja incluída na tabela, com o coeficiente da função objetivo igual ao do início do problema para aquela variável. Na coluna da variável que estava na base, no coeficiente da função objetivo, deve-se colocar o valor 1, e então proceder como se tal variável fosse uma variável artificial que deve ser eliminada da tabela. Assim que a variável antiga é eliminada, a nova coluna que já estava nos cálculos deve tomar o seu lugar e deve haver a continuação do algoritmo simplex.

#### 2.5.4. Eliminação ou acréscimo ou de uma variável.

Para eliminar uma variável que não seja básica, basta retirá-la do quadro. Se a variável a ser retirada for básica, antes de retirá-la, deve-se escolher outra variável e formar uma base, transformando assim a variável a ser retirada em não básica, podendo excluí-la sem problemas e então dar continuidade a resolução pelo algoritmo simplex se for necessário (GOLDBARG et al., 2000).

Para que uma variável seja acrescentada, a parte das restrições deve ser atualizada da seguinte forma:

$$a_{(n+1)atual} = B^{-1} a_{n+1} \quad (2.15)$$

$B^{-1}$  é a matriz inversa da base encontrada no quadro final e

$a_{n+1}$  é o vetor coluna dos coeficientes da nova variável nas restrições, que deseja-se atualizar.

O coeficiente da função objetivo para a nova variável deve ser atualizado da seguinte forma:

$$c_{(n+1)atual} = c_B B^{-1} a_{n+1} - c_{n+1} \quad (2.16)$$

$c_B$  são os coeficientes da função objetivo das variáveis da base do quadro inicial e



$c_{n+1}$  é o coeficiente da função objetivo que deseja-se atualizar para a nova variável.

O valor de  $c_{(n+1)atual}$  vai determinar se a nova variável incluída deverá entrar na base ou não na continuação da resolução pelo algoritmo simplex.

### 2.5.5. Acréscimo ou eliminação de uma restrição.

A inclusão de uma restrição pode diminuir o espaço vetorial das soluções viáveis, e, de acordo com Goldbarg et al. (2000) o valor da função objetivo pode ser alterado, aumentando se o objetivo for minimizar, ou diminuindo se o objetivo for de maximizar.

Se a parte do espaço vetorial onde se encontrar a solução apontada pelo simplex não for retirada com a nova restrição, a solução é viável e ótima. Se o espaço vetorial ocupado pelo vetor solução no conjunto de soluções viáveis for retirado, então o problema é inviável, isto é, sem solução. Para determinar se o problema é viável ou não, Murty (1976) explica que é preciso verificar se o vetor solução satisfaz ou não a nova restrição incluída. Caso não satisfaça, Goldbarg et al. (2000) afirma que o melhor a fazer é incluir a nova restrição no quadro inicial e reiniciar a resolução para obter uma nova base.

Quando uma restrição de desigualdade for excluída, Goldbarg et al. (2000), explica que se a variável básica associada a ela for de folga, então a restrição é inativa, e a sua eliminação não modifica a solução ótima. Caso a restrição seja uma igualdade ou uma desigualdade em que a variável básica associada a ela seja real, então a resolução do algoritmo simplex deve ser reiniciada excluindo-se a restrição.

Para um estudo mais sistemático e aprofundado dos parâmetros, é sugerida a Programação Paramétrica, que não será abordada neste trabalho.

É válido lembrar que a análise de sensibilidade é feita diretamente por alguns dos *softwares* de resolução do problema de Programação Linear. Nos resultados estes aplicativos apresentam os intervalos nos quais os parâmetros podem variar sem que a solução ótima seja alterada, recurso este, de grande utilidade em algumas aplicações.

## 2.6. PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA

Existem casos em que as variáveis de um modelo de Programação Linear (PL) assumem apenas valores inteiros. Quando essa condição é aplicada a todas as variáveis, tem-se um modelo de Programação Linear Inteira (PLI), e quando apenas algumas das variáveis

são inteiras, diz-se que o modelo é de Programação Linear Inteira Mista (PLIM). Lachtermacher (2007) explica que a única diferença desse modelo para o modelo de Programação Linear, no que diz respeito à formulação, é a inclusão de restrições sobre as variáveis que assumem valor inteiro. Quando em um problema de Programação Linear Inteira não são consideradas as restrições de inteireza sobre as variáveis inteiras, então o problema é tratado como de Programação Linear e chamado de relaxado, pelo motivo de se ter relaxadas ou aliviadas aquelas restrições.

Na tentativa de obter valores inteiros, alguns podem sugerir a resolução do modelo do problema relaxado e depois então o arredondamento, ou truncamento da solução. Lachtermacher (2007) afirma que para problemas de grande porte, a solução obtida dessa forma pode ser aceitável, porém, para problemas menores, a solução obtida dessa forma pode estar distante da ótima. Isso pode ocorrer pelo motivo de não existir ponto inteiro viável vizinho ao ponto ótimo relaxado, ou, que o ponto inteiro vizinho mais próximo seja viável e não ótimo.

Existem vários algoritmos para solucionar o problema da obtenção de valores inteiros para as variáveis na resolução do modelo de Programação Linear Inteira. Dois algoritmos serão abordados: algoritmo *Branch and Bound* e algoritmo de Corte de Gomory.

### 2.6.1. Algoritmo *Branch and Bound*

Partindo da solução ótima dada pela resolução do modelo do problema relaxado, este algoritmo consiste na seguinte prática descrita por Caixeta-Filho (2004):

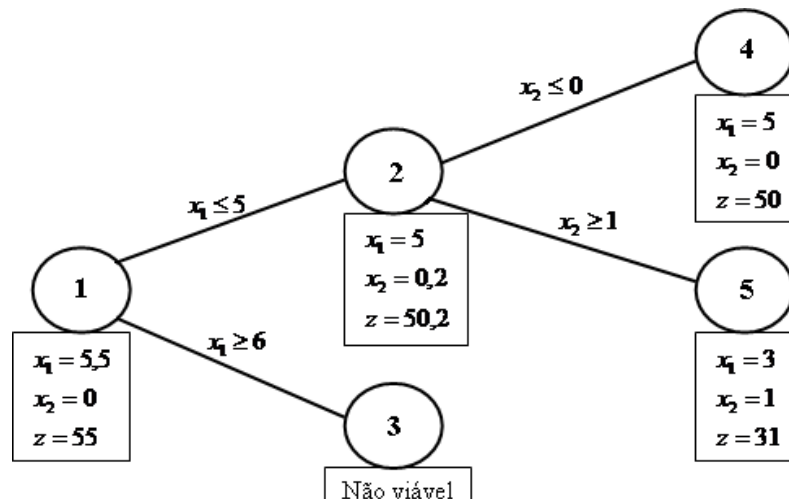
- Examinar a solução ótima do problema relaxado, verificando se as variáveis que deveriam ser inteiras são efetivamente valores inteiros. Em caso positivo, o problema está resolvido. Senão, seguir para o próximo procedimento.
- Tomando uma variável  $x_j^*$  que deveria ser inteira, mas que não obteve solução inteira, tem-se que  $i_1 < x_j^* < i_2$ , onde  $i_1$  e  $i_2$  são inteiros consecutivos e não negativos. Dois novos modelos de Programação Linear Inteira devem ser criados. Um acrescentando ao problema de PLI original a restrição  $x_j \leq i_1$ , e outro acrescentando a restrição  $x_j \geq i_2$ .
- Se algumas das primeiras aproximações continuarem a apresentar soluções não inteiras, o problema de programação originado por esta primeira aproximação deve ser bifurcado, conforme explicado no parágrafo anterior.

- A bifurcação continua, não devendo necessariamente parar para o primeiro valor inteiro obtido, pois nem sempre o primeiro valor inteiro encontrado para a variável gera solução ótima na função objetivo. Dois casos devem ser considerados.
  - Se o problema for de maximização, o valor da função objetivo correspondente à primeira aproximação inteira torna-se um limite inferior para o problema. Todos os modelos cujas primeiras aproximações, inteiras ou não, conduzam a valores da função objetivo menores que o limite inferior devem ser descartados.
  - Se o problema for de minimização, o valor da função objetivo a partir da primeira solução inteira torna-se o limite superior do problema, devendo ser eliminados os modelos com valores da função objetivo maiores que o limite superior corrente.
- O processo de bifurcação prossegue até que não existam mais modelos com a primeira aproximação não inteira a considerar. A solução é dada pela aproximação inteira que obteve valor ótimo para a função objetivo, seja ela de maximização ou minimização.

Ao aplicar-se o algoritmo *Branch and Bound*, pode-se construir um diagrama tipo árvore. Este diagrama irá representar os dois novos problemas gerados com bifurcações a partir dos seus problemas de origem. Por esse motivo tal algoritmo também é conhecido como algoritmo de bifurcação e limite.

No exemplo a seguir pode-se observar o diagrama correspondente a resolução de um desses problemas (BRONSON, 1985):

$$\begin{array}{ll}
 \text{Maximizar } z = 10x_1 + x_2 \\
 \text{Sujeito a } & 2x_1 + 5x_2 \leq 11 \\
 & x_1, x_2 \geq 0
 \end{array} \tag{2.17}$$

FIGURA 1: DIAGRAMA NA RESOLUÇÃO DO ALGORITMO *BRANCH & BOUND*

FONTE: BRONSON (1985)

### 2.6.2. Algoritmo de Corte de Gomory

O algoritmo é conhecido por este nome porque “corta” a região de soluções viáveis pela inclusão de uma restrição de cada vez, e esta restrição é uma desigualdade válida, que pode ser obtida pelo método de *Chavátal-Gomory* (ARENALES et al., 2007). As etapas a seguir citadas por Bronson (1985) descrevem o algoritmo.

**Etapa 1:** No quadro final do simplex, seleciona-se a variável que não tenha valor inteiro e que deseja ser inteira. Sem atribuir valor nulo às variáveis não básicas, considere-se a equação de restrição representada pela linha da variável escolhida.

**Etapa 2:** Cada coeficiente da equação obtida na Etapa 1 deve ser reescrito como a soma algébrica de um inteiro e de uma fração positiva entre 0 e 1. Em seguida, deve-se reescrever a equação de forma que o primeiro membro contenha somente termos com coeficiente fracionários e uma constante fracionária, enquanto o segundo membro contenha somente termos com coeficientes inteiros e uma constante inteira.

**Etapa 3:** Uma nova restrição é obtida exigindo-se que o primeiro membro da equação reescrita seja não negativo. Economiza-se tempo anexando a nova restrição ao quadro final do simplex, ao invés de retornar ao início do problema.

**Etapa 4:** Se for verificado que a variável não obteve valor inteiro depois da utilização do algoritmo simplex ao quadro com a restrição da Etapa 3, deve-se retornar à Etapa 1, caso contrário, a solução ótima foi encontrada.

O algoritmo de *Gomory* nem sempre converge para uma solução inteira, porém se ele converge, o resultado é obtido rapidamente. A escolha da primeira solução obtida como ótima, podendo perder-se outras soluções melhores que a primeira mostra-se como uma das desvantagens do algoritmo (ARENALES et al., 2007).

Esses algoritmos encontram-se implementados nos *softwares* de resolução de modelos de Programação Linear, bastando indicar a restrição de inteireza para as variáveis necessárias. Dessa forma, o resultado inteiro é obtido diretamente.

## 2.7. PROGRAMAÇÃO LINEAR BINÁRIA

A Programação Linear Binária corresponde a um caso particular da Programação Linear Inteira em que as variáveis além de serem inteiras, devem assumir somente o valor 0 ou 1. Assim como na Programação Linear Inteira, pode ser que nem todas as variáveis necessitem valor binário. Neste caso tem-se um problema misto. No caso do problema puro, ou seja, todas as variáveis binárias, o indicado para a obtenção da solução ótima é analisar todas as combinações possíveis. Mas, segundo Lachtermacher (2007), a busca exaustiva implicaria num esforço computacional demasiado e seria impraticável.

De forma exaustiva, todos os valores possíveis para a função objetivo são calculados e é escolhido aquele que apresenta maior valor, no caso de maximização, ou o menor valor, no caso de minimização. O problema está no fato de que ela só consegue ser aplicada a problemas pequenos. O número de combinações possíveis de soluções cresce de forma exponencial, isto é, de forma muito rápida. Um problema de Programação Linear Inteira com 100 variáveis de decisão do tipo binária (variáveis que assumem os valores 0 ou 1) terá até  $2^{100}$  soluções viáveis, isto é,  $1,27 \times 10^3$  soluções possíveis.

Para não produzir um número infundável de soluções, uma das alternativas aconselháveis em alguns casos é colocar as restrições de que as variáveis binárias assumam valores entre 0 e 1 inclusive esses valores e depois ir obtendo valores binários para cada uma das variáveis pelo algoritmo *Branch and Bound* ou pelo algoritmo de Corte de *Gomory*.

A obtenção de valores binários para algumas variáveis na resolução dos modelos por meio de *softwares* é possível. Basta informar aos *softwares* quais são as variáveis que assumem valor binário. Porém, o esforço computacional é maior e dependendo do tamanho do problema, o computador pode demorar a apresentar uma solução.

### 3. REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1. PLANEJAMENTO FLORESTAL

Para obtenção de recursos naturais e financeiros de uma floresta de forma ininterrupta, o administrador deve preocupar-se com várias indagações em relação a ações a serem tomadas. Quando e quanto colher da espécie para obter certo produto florestal na época desejada? Efetuado o desbaste, como garantir que o remanescente na floresta será suficiente para produzir certo volume de dado produto florestal nos próximos períodos? Qual o melhor momento e forma de efetuar a colheita? As ações escolhidas gerarão uma receita suficiente a cada período? Esses são alguns dos questionamentos que o administrador da floresta deve responder a fim de estabelecer um planejamento de manejo, ou seja, um conjunto de atividades, que ocorrerão na floresta ao longo de um horizonte de tempo. Leuschner (1984) afirma que a gestão florestal se refere ao estudo e aplicação de técnicas analíticas de busca de alternativas de gerenciamento que mais contribuem para os objetivos organizacionais.

Sob a imposição de determinados alvos, a sequência de ações realizadas sobre o solo de uma floresta com a finalidade de alcançá-los, em um determinado horizonte de tempo são conhecidas como manejo florestal, ou gestão florestal. Como enfatizado por Leuschner (1984), para realizar a sua tarefa de forma eficaz o administrador poderá utilizar técnicas analíticas a fim de tomar as melhores decisões, ou seja, que mais se aproximem dos objetivos pré-estabelecidos.

Alguns dos termos mais utilizados pelos estudiosos quando o assunto discutido é planejamento de manejo florestal são enfatizados por Rodrigues (1991) e estão listados e explicados a seguir:

**Rotação:** compreende o período de tempo decorrido entre o crescimento inicial da muda, ou da brotação, e o corte da floresta.

**Ciclo Florestal:** definido como o período de tempo decorrido entre o plantio da muda e o corte raso final da floresta e pode compreender uma ou mais rotações.

**Talhão Florestal:** resultado da subdivisão em pequenas áreas de uma floresta implantada e voltada para o suprimento industrial, com localização e dimensões bem definidas e, em geral, permanentes.

**Estrato Florestal:** conjunto de talhões florestais agrupados por apresentarem o mesmo potencial produtivo, idade e localização topográfica.

**Horizonte de Tempo/Planejamento:** corresponde ao período de tempo ao longo do qual serão considerados certos objetivos e restrições. Deve ser suficientemente longo para suportar 1,5 a 2 ciclos de uma floresta qualquer.

**Regime de Manejo:** corresponde ao conjunto de práticas silviculturais necessárias para implementar a repetição de um mesmo ciclo florestal ao longo do horizonte de tempo/planejamento.

O conhecimento do horizonte de planejamento, da dimensão do estrato florestal, dos possíveis regimes de manejo, do comportamento da espécie ao longo do horizonte de planejamento, entre outros parâmetros, tais como a quantidade esperada dos produtos florestais produzidos e a receita esperada por período, permite ao gestor o uso de métodos analíticos que auxiliem a escolha do manejo florestal.

Dentre tantas finalidades da gestão florestal, tais como suprir a demanda de mercado de determinados sortimentos e garantir maior lucratividade ao produtor dentro de suas possibilidades de investimento, está também presente a preocupação com a preservação do meio ambiente, dentre outras questões ambientais. Sistemas baseados em técnicas matemáticas de programação e otimização do manejo florestal podem auxiliar a gestão de recursos naturais de maneira a gerar fluxos sustentáveis de produção e manter condições mínimas naturais necessárias à preservação do ecossistema (RODRIGUEZ, 2005). Uma das formas de promover esse tipo de gestão é a definição de um Modelo Matemático que represente e reproduza as relações que governam o sistema e então utilizar ferramentas da Pesquisa Operacional para obtenção de resultados e simulação de cenários que auxiliem o tomador de decisão na seleção dos planos de manejo. O problema da formulação matemática motivou alguns estudiosos e favoreceu o desenvolvimento de vários modelos, dentre os quais destacam-se os Modelos I e II de Johnson e Scheurman (1977), evidenciados a seguir.

### 3.2. MODELO I DE JOHNSON E SCHEURMAN

Johnson e Scheurman (1977) preocuparam-se com o problema de determinação de um plano de manejo no qual restrições de área, de produção, operacionais, de rendimento por período, entre outras fossem satisfeitas. Além disso, tal manejo deveria promover uma lucratividade máxima.

Dados vários estratos florestais, para os quais é possível executar vários regimes de manejo, cada um apresentando retorno financeiro e fluxo de caixa diferentes, qual será a melhor combinação dos regimes de manejos? Quantas unidades de área de cada estrato destinar a um regime de manejo para suprir a demanda de certos sortimentos? Como garantir uma renda mínima, ou um gasto máximo por período? Esses são alguns questionamentos em relação ao Modelo I que Johnson e Scheurman (1977) levam em consideração. As partes que compõem o modelo são explicadas a seguir.

Os vários estratos florestais estão enumerados pelo índice  $i = 1, 2, \dots, N$ .

$M$  é a quantidade de possíveis regimes de manejos. O índice para esses manejos é  $k = 1, 2, \dots, M$ .

As variáveis do problema são dadas por  $x_{ik}$ , que correspondem a quantidade de unidades de área do  $i$ -ésimo estrato que serão destinadas ao manejo  $k$ . Geralmente, a unidade de área utilizada é o hectare. O Modelo de Johnson e Sheurman refere-se a unidades de área como hectares de forma direta.

O horizonte de tempo é de  $n$  períodos e o índice referente a esses períodos é  $j = 1, 2, \dots, n$ . A medida que tem sido mais utilizada para um período é o ano. Pode-se observar a seguir nos artigos citados como exemplificação da aplicação dos Modelos de Johnson e Scheurman, que tanto no I como no II, os autores utilizaram anos.

### 3.2.1. Função objetivo

O lucro gerado por um estrato  $i$  sob regime de manejo  $k$ , é dado por  $P_{ik} \cdot x_{ik}$ . Visto que o valor  $P_{ik}$  é dado por unidade de área, basta multiplicá-lo pela quantidade de área destinada ao manejo  $k$  do estrato  $i$ . Somando-se todos os  $P_{ik} \cdot x_{ik}$  possíveis, tem-se o valor total do lucro, que deve ser maximizado. Sendo assim, a função objetivo é dada por

$$\text{Maximizar } z = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M P_{ik} \cdot x_{ik} \quad (3.1)$$

Johnson e Scheurman indicam o cálculo de  $P_{ik}$  pela seguinte fórmula:

$$P_{ik} = \sum_{j=1}^n \frac{T_{ikj}G_{ikj} - C_{ikj}}{\gamma^j} + \frac{T_{ikn}}{\gamma^n}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad k = 1, 2, \dots, M \quad (3.2)$$



- $T_{ikj}$  - lucro por unidade de área do estrato  $i$  sob regime de manejo  $k$  no período  $j$ ;
- $G_{ikj}$  - volume de produto florestal produzido por unidade de área do estrato  $i$  sob regime de manejo  $k$  no período  $j$ ;
- $C_{ikj}$  - custo com tratamento e manutenção por unidade de área do estrato  $i$  sob regime de manejo  $k$  no período  $j$ .
- $T_{ikn}$  - valor líquido dado no  $n$ -ésimo período na unidade de manejo  $i$  sob regime de manejo  $k$
- $\gamma^j$  - taxa de descapitalização no período  $j$ , e
- $\gamma^n$  - taxa de descapitalização no período  $n$ .

Outra forma para calcular  $P_{ik}$  que tem se difundido na literatura leva em consideração o Valor Esperado da Terra (*VET*). De acordo com Rodrigues (1991), o valor esperado da terra consiste em maximizar o valor presente de uma série periódica e infinita de pagamentos iguais que representam as receitas líquidas de um ciclo florestal. Tal fórmula foi apresentada por Faustmann em 1849. Desde então é conhecida como fórmula de Faustmann. Para exemplificar, serão apresentadas as fórmulas para cálculo do *VET* de um regime de manejo para um ciclo de duas rotações. Primeiro é necessário calcular a receita líquida total no último período do fluxo de caixa para cada regime de manejo  $k$ . Este cálculo pode ser feito a partir de:

$$RLT_k = (p - e)V_r(1 + \tau)^{(n-r)} + (p - e)V_n - I(1 + \tau)^n - \sum_{j=1}^n m_j(1 + \tau)^j \quad (3.3)$$

- $r$  - ano em que ocorre o primeiro corte;
- $n$  - ano em que ocorre o segundo e último corte;
- $I$  - custo total de implantação;
- $m_j$  - custo de implantação no ano  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ );
- $V_j$  - volume de madeira explorada no ano  $j$ ;
- $P$  - peso, por unidade de peso ou volume, da madeira explorada;
- $e$  - custo de exploração por unidade de peso ou volume; e
- $\tau$  - taxa de descapitalização.

O cálculo do *VET* é dado pela fórmula do valor presente de uma série perpétua de pagamentos periódicos, ou, para o caso exemplificado, de fluxos de caixa idênticos. Então, para os fluxos de caixa referentes a cada regime de manejo:

$$VET_k = \frac{RLT_k}{(1 + \tau)^n - 1} \quad (3.4)$$

Obtido o  $VET$ , para cada regime de manejo, é possível obter os coeficientes  $P_{ik}$  da função objetivo, que são então chamados de valores presentes do regime de manejo. Para a função, basta somar o  $VET$  à receita do corte da última rotação do regime. Isso torna comparáveis os valores presentes de vários regimes. Então, dado o estrato  $i$ , para cada um dos  $k = 1, \dots, M$  regimes de manejo é obtido um valor presente com a fórmula:

$$P_{ik} = \sum_{j=0}^n \left( \frac{(p - e)V_j - I - m_j}{(1 + \tau)^j} \right) + \frac{VET_k}{(1 + \tau)^n} \quad (3.5)$$

Outro valor utilizado para obter-se os parâmetros  $P_{ik}$  da função objetivo é o valor presente líquido ( $VPL$ ). Conhecidos o fluxo de caixa que contém os valores  $v_{ikj}$ , do  $j$ -ésimo período do planejamento no  $i$ -ésimo estrato florestal sob regime de manejo  $k$ , e a taxa  $\tau$ , é possível descapitalizar os valores  $v_{ikj}$ . De acordo com Souza e Clemente (2008) tais valores descapitalizados referentes a cada um dos períodos são chamados valor presente ( $VP$ ) e calculados:

$$vp_{ikj} = \frac{v_{ikj}}{(1 + \tau)^j}, \quad i = 1, \dots, N, k = 1, \dots, M, j = 1, \dots, n \quad (3.6)$$

O somatório dos valores presentes de um fluxo de caixa para todos os períodos de planejamento gera um parâmetro referente ao lucro que seria obtido do estrato  $i$  para cada um dos regimes de manejo  $k$  na data atual. Tal parâmetro é conhecido como valor presente líquido ( $VPL$ ):

$$VPL_{ik} = \sum_{j=1}^n vp_{ikj}, \quad i = 1, \dots, N, k = 1, \dots, M \quad (3.7)$$

Outra forma de obter  $P_{ik}$  é fazendo-se  $P_{ik} = VPL_{ik}$ .

### 3.2.2. Restrições

A primeira restrição que deve ser considerada pelo modelo refere-se a área disponível para o plantio. O somatório das áreas  $x_{ik}$ , ou seja, dos manejos  $k$  no estrato  $i$  não deve ultrapassar a área do estrato  $i$  dada por  $A_i$ . Geralmente, o sinal de igualdade é utilizado, ao invés do sinal de menor ou igual, pois, se o objetivo é maximizar o lucro, o que se espera é que toda a área seja plantada.

$$\sum_{k=1}^M x_{ik} = A_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.8)$$

Uma área  $F_i < A_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$  pode ser utilizada quando for desejável utilizar-se uma área menor que a do estrato.

A base para o modelo é a função objetivo e a restrição referente à área. Mas, o modelo pode ser enriquecido com outras restrições que Johnson e Scheurman (1977) citam em seu artigo. Algumas dessas restrições são explicadas a seguir.

É possível restringir a produção dos sortimentos a valores mínimos e máximos por período. O índice para os  $L$  sortimentos possíveis será  $l = 1, 2, \dots, L$ . O valor mínimo para o sortimento  $l$  no período  $j$  será dado por  $VMIN_{jl}$ , e o valor máximo será dado por  $VMAX_{jl}$ . Para tal, faz-se necessário saber a quantidade de um determinado sortimento produzido em um estrato  $i$  sob regime de manejo  $k$  em uma unidade de área a cada período  $j$ . Essa quantidade pode ser dada por volume ou massa, enfim, pela unidade na qual é medido o sortimento. Tal valor será chamado de  $V_{ijkl}$ . O produto  $V_{ijkl} \cdot x_{ik}$  indica o quanto um estrato  $i$  produzirá de sortimento  $l$  com manejo  $k$  no período  $j$ . O somatório variando os estratos e os manejos de  $V_{ijkl} \cdot x_{ik}$  nos períodos para cada sortimento indica a quantidade total produzida de dado sortimento por todos os estratos em um dado período. Sendo assim, será possível estabelecer um mínimo e um máximo de cada sortimento produzido. Surgem então as duas restrições a seguir:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M V_{ijkl} x_{ik} \geq VMIN_{jl}, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad l = 1, 2, \dots, L \quad (3.9)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M V_{ijkl} x_{ik} \leq VMAX_{jl}, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad l = 1, 2, \dots, L \quad (3.10)$$

O modelo pode ainda contemplar restrições operacionais que ocorram por período. Tais restrições podem ser referentes a mão de obra, maquinário, capacidade de plantio, entre outras. Para cada uma das restrições operacionais é necessário estabelecer um valor mínimo  $EMIN_j$  e um valor máximo  $EMAX_j$  de unidades de área que podem sofrer tal operação por período. Também, é necessário saber em que períodos tal operação é realizada para cada manejo  $k$  em cada estrato  $i$ . Para tal será utilizada a constante binária  $a_{ijk}$ , que assume valor 1 se determinada operação é feita em um estrato  $i$  sob o manejo  $k$  no período  $j$ , e zero caso contrário. O produto  $a_{ijk} \cdot x_{ik}$  determina a quantidade de unidades de área do estrato  $i$  que estará utilizando determinada operação no período  $j$ . O somatório de  $a_{ijk} \cdot x_{ik}$  deverá estar entre  $EMIN_j$  e  $EMAX_j$ , ou seja,

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M a_{ijk} x_{ik} \geq EMIN_j, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3.11)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M a_{ijk} x_{ik} \leq EMAX_j, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3.12)$$

O modelo também prevê restrições orçamentárias por período. Para tal, é necessário determinar valores mínimo  $DMIN_j$  e máximo  $DMAX_j$  por período  $j$  de receita esperada. O fluxo de caixa fornece o valor de contribuição financeira de determinado manejo  $k$  em cada estrato  $i$  a cada período  $j$ , em uma unidade de área. Tal valor é representado por  $D_{ijk}$ . Para saber o quanto um estrato  $i$  está contribuindo na receita basta fazer  $D_{ijk} \cdot x_{ik}$ , para todos os manejos  $k$  desse estrato. O somatório das receitas dos estratos  $i$  corresponde ao valor em caixa do período  $j$  que deverá estar entre  $DMIN_j$  e  $DMAX_j$ .

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M D_{ijk} x_{ik} \geq DMIN_j, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3.13)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M D_{ijk} x_{ik} \leq DMAX_j, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3.14)$$

Como todo problema de Programação Linear, tem-se finalmente a restrição de não negatividade. Se os coeficientes da função objetivo e das restrições forem calculados por unidade de área, como indica o Modelo de Johnson e Scheurman (1977), então as variáveis  $x_{ik}$  deverão ser maiores ou igual a zero, pois indicam a quantidade de unidades de área sob determinado manejo. Se os coeficientes da função objetivo e das restrições forem calculados

com base na utilização dos regimes de manejo no estrato inteiro, então  $x_{ik}$  deverá ser uma variável inteira binária, o que promoveria uma variação do modelo original.

### 3.2.3. Algumas aplicações

O modelo base sugerido por Johnson e Scheurman (1977) é utilizado por vários estudiosos na determinação de planejamento estratégico na ocupação de área florestal quando vários regimes de manejo podem ser considerados. Dependendo das especificidades do problema o modelo pode ser modificado, restrições podem ser acrescentadas ou retiradas. Alguns trabalhos que utilizaram o Modelo I de Johnson e Scheurman podem ser destacados.

Rodrigues e Moreira (1989) utilizam o modelo no gerenciamento de uma floresta de *Eucalyptus* de 505 hectares com três espécies de *Eucalyptus* pertencente a uma indústria do setor de papel e celulose. No seu estudo de caso, 4 estratos e 21 períodos determinaram um modelo com 21 variáveis  $x_{ik}$  e 25 restrições. A solução foi obtida através do programa LP88.

Falcão e Borges (2001) utilizam o Modelo I na geração de indivíduos para resolver um problema de planejamento florestal usando computação evolucionária. No trabalho, a modelagem sofre adaptações. As variáveis  $x_{ik}$ , tornam-se inteiras e binárias, assumindo valor 1 caso o regime de manejo  $k$  seja aplicado a unidade de gestão  $i$ , e zero, em caso contrário. Apenas um regime de manejo pode ser aplicado a uma unidade de gestão. Somente as restrições relativas à produção do sortimento  $l$  num período  $j$  são utilizadas. Um desvio admissível  $d_{lj}$  do volume do sortimento  $l$  no período  $j$  é considerado para determinar a produção mínima e a produção máxima desejada em cada período.

### 3.3. MODELO II DE JOHNSON E SCHEURMAN

No Modelo do tipo I apenas um regime de manejo é escolhido para uma unidade de manejo e o mesmo deve ser repetido até o final do horizonte de planejamento. No Modelo tipo II é possível que uma unidade de gestão seja inicialmente dividida de uma forma e receba alguns regimes de manejo, e depois seja dividida de outra forma diferente da inicial e assuma regimes de manejos distintos. Tudo em uma mesma área desde que o último regime de manejo não ultrapasse o horizonte de planejamento.

Nessa modelagem sempre são previstas duas situações, a inicial, na qual parte-se do primeiro período e cada estrato possui uma configuração e é chamado de estrato inicial, e a

situação do estrato depois de reformulado, e assumindo outros regimes de manejo, que é dito depois da reforma, ou estrato reformado.

Quando um novo regime de manejo é assumido diz-se que houve uma reforma, e a área, ao assumir um novo regime de manejo dentro de um horizonte de planejamento, é chamada de área reformada. A principal característica do Modelo II é que uma mesma área assume vários regimes de manejo até atingir o final do horizonte de planejamento, daí diz-se que um estrato perde a sua identidade.

### 3.3.1. Função objetivo

Dados  $N$  estratos iniciais ( $i = 1, \dots, N$ ), e um horizonte de tempo de  $n$  períodos ( $j = 1, \dots, n$ ) a função objetivo do Modelo tipo II, de acordo com Rodrigues (1991) é dada da seguinte forma:

$$Max \ Q = \sum_{i=1}^N \sum_{j=i}^n D_{ij} Y_{ij} + \sum_{j=1}^{n-g} \sum_{w=j+g}^n E_{jw} X_{jw} + \sum_{i=1}^N T_i W_i + \sum_{j=1}^n Z_j U_j \quad (3.15)$$

- $D_{ij}$  - valor presente líquido do fluxo de caixa entre o ano 0 e o ano  $j$ , medido por unidade de área quando ocorre o corte no ano  $j$ ;
- $Y_{ij}$  - quantidade de unidades de área do estrato  $i$  explorados no ano  $j$ ;
- $E_{jw}$  - valor presente líquido do fluxo de caixa entre o ano  $j$  e o ano  $w$ , medido por unidade de área quando ocorre o corte no ano  $w$ ;
- $X_{jw}$  - quantidade de unidades de área reformadas no ano  $j$  e exploradas no ano  $w$ ,  $w = j + g, \dots, j + n$
- $T_i$  - valor presente líquido por unidade de área do estrato  $i$  que não recebeu intervenção primeiro ao último período;
- $W_i$  - quantidade de unidades de área que não recebeu intervenção do primeiro ao último período;
- $Z_j$  - valor presente líquido por unidade de área reformada no ano  $j$  que não recebeu mais intervenção a partir de um dado período até o último período do horizonte de planejamento;
- $U_j$  - quantidade de unidades de área reformadas no ano  $j$ , que não recebeu mais intervenção de um dado período até o último período do horizonte de planejamento;
- $G$  - duração mínima de um ciclo florestal.

Vê-se portanto, que a função objetivo leva em consideração a área reflorestada no início do período, a área reformada e as áreas que não receberam manutenção a partir de qualquer período do horizonte de planejamento. Assim como no Modelo tipo I tem-se um somatório de valores presentes líquidos.

Para o cálculo dos valores presentes líquidos  $D_{ij}$  e  $E_{jw}$ , Johnson e Scheurman (1977) sugerem as seguintes fórmulas:

$$D_{ij} = \sum_{f=\max(i,1)}^j \frac{T_{ifj}G_{ifj} - C_{ifj}}{\gamma^f} \quad (3.16)$$

- $T_{ifj}$  - preço de uma unidade de volume colhida no período  $f$ , sob regime de manejo que tenha iniciado o ciclo florestal no período  $i$  e findado no período  $j$ ;
- $G_{ifj}$  - volume colhido em um hectare no período  $f$ , sob regime de manejo que tenha iniciado o ciclo florestal no período  $i$  e findado no período  $j$ ;
- $C_{ifj}$  - custo de manutenção em um hectare no período  $f$ , sob regime de manejo que tenha iniciado o ciclo florestal no período  $i$  e findado no período  $j$ ;
- $\gamma^f$  - taxa de descapitalização no período  $f$ .

$$E_{jw} = \sum_{f=\max(j,1)}^n \frac{T_{ifn}G_{ifn}}{\gamma^f} + \frac{T_{jn}}{\gamma^n} \quad (3.17)$$

- $T_{ifn}$  - menor preço por unidade de volume colhida dos hectares reformados no período  $f$  e com ciclo florestal findando no período  $n$ ;
- $G_{ifn}$  - menor quantidade de volumes colhidos dos hectares reformados no período  $f$  e com ciclo florestal findando no período  $n$ ;
- $C_{ifn}$  - custo de manutenção de um hectare reformado no período  $f$  e com ciclo florestal findando no período  $n$ ;
- $T_{jn}$  - valor líquido de hectares com ciclo florestal iniciando no período  $f$  e findando no período  $n$ ;
- $\gamma^f$  - taxa de descapitalização no período  $f$  e
- $\gamma^n$  - taxa de descapitalização no período  $n$ .

### 3.3.2. Restrições

Rodrigues (1991) apresentam algumas restrições para esse modelo. Uma destas considerada indispensável nas modelagens em busca de um manejo ótimo é a que leva em

consideração a área dos estratos. O somatório das variáveis que correspondem à quantidade de unidades de áreas a serem ocupadas não pode ultrapassar a área  $A_i$  do estrato. A primeira restrição se refere ao estrato inicial, e a segunda ao estrato reformado.

$$\sum_{j=1}^n Y_{ij} + W_i = A_i, \quad i = 1, \dots, N \quad (3.18)$$

$$\sum_{w=j+g}^n X_{iw} + U_j - \sum_{i=1}^N Y_{ij} = 0, \quad i = 1, \dots, N, \quad j = 1, \dots, n \quad (3.19)$$

Outra restrição, que está entre as mais utilizadas, é a que se refere à produção por período. Se  $V_{ij}$  for o volume obtido em um hectare do estrato  $i$  no período  $j$ , e  $H_{wj}$  for tal volume explorado no período  $j$  de partes do estrato reformados no período  $w$ , tem-se:

$$\sum_{i=1}^N V_{ij} Y_{ij} + \sum_{w=1}^{j-g} H_{wj} X_{wj} \geq VMIN_j, \quad j = 1, \dots, n \quad (3.20)$$

$VMIN_j$  - volume mínimo de produção desejada no período  $j$ .

Também pode-se impor um limite superior de produção da seguinte forma:

$$\sum_{i=1}^N V_{ij} Y_{ij} + \sum_{w=1}^{j-g} H_{wj} X_{wj} \leq VMAX_j, \quad j = 1, \dots, n \quad (3.21)$$

$VMAX_j$  - volume máximo de produção desejada no período  $j$ .

### 3.3.3. Algumas aplicações

Dentre os autores que utilizaram o Modelo II está Rodrigues et. al (2006). Em seu trabalho, propõem um problema e o resolvem via Modelo I, Modelo II e via Modelo II com restrição de integridade das unidades de manejo. Para resolução do problema foi utilizada uma área de 515 hectares, dividida em 10 unidades de manejo. No Modelo I os coeficientes da função objetivo foram o valor presente líquido da  $j$ -ésima alternativa da  $i$ -ésima unidade de manejo. As restrições consideradas foram as de recobrimento, ou de área, e também as restrições de produção, sendo dadas demandas mínimas e máximas por período. À resolução do problema foram necessárias 63 variáveis. Para o Modelo II, além das restrições consideradas pelo Modelo I foi incluída a restrição de reagrupamento das unidades de manejo.



Foram necessárias 42 variáveis, sendo 28 inteiras, e 14 contínuas, descrevendo um problema de Programação Linear Inteira Mista, o que não garantiu a integridade dos talhões. Outra situação estudada foi a resolução via Modelo II com restrição de integridade, ou seja, impedido-se o fracionamento dos talhões e unidades de manejo. Para tal foi necessário reformular a restrição de reagrupamento das unidades de manejo, o que gerou um problema de Programação Não-linear com 42 variáveis, sendo 37 binárias e 5 contínuas. A formulação do problema de Programação Linear Inteira via Modelo II teoricamente seria mais vantajosa, pois a quantidade de variáveis geradas seria menor, o que aumentaria a eficiência do algoritmo de resolução do problema. Porém, quando o problema de Programação Linear Inteira foi formulado via Modelo II, fez-se necessário o uso de restrições não lineares, o que resultou em um problema de Programação Não-linear Inteira. Problemas assim são de solução mais complexa e também contam com a baixa eficiência dos algoritmos de solução por métodos exatos. Apesar dessas dificuldades, a solução apontada pelo modelo de Programação Não-Linear Inteira foi muito próximo do resultado apontado pelo Modelo I.

### 3.4. OUTROS MÉTODOS PARA A OTIMIZAÇÃO DO MANEJO FLORESTAL

Os Modelos I e II de Johnson e Scheurman podem ser associados a métodos matemáticos exatos para a obtenção de um planejamento de manejo florestal. Também pode-se aplicar outros métodos, não exatos, chamados heurísticas, para a resolução destes problemas. Rodrigues et. al (2004) alertam com relação ao uso de algumas técnicas heurísticas mais sofisticadas, conhecidas como metaheurísticas. Entre estas pode-se citar: Algoritmo Genético (AG), *Simulated Annealing* (SA) e Busca Tabu (BT).

Dentre os trabalhos desenvolvidos com Algoritmo Genético, destaca-se o de Silva et. al (2009), no qual são testadas a eficácia e a eficiência computacional do AG na solução de problemas de planejamento florestal, por comparação com resultados obtidos com o algoritmo de resolução do problema na forma exata pelo *software* CPLEX. A eficiência foi analisada pelo tempo total de processamento, e a eficácia pela diferença percentual entre a resposta do Algoritmo Genético e a resposta exata do algoritmo *Branch and Bound* implementado no *software* CPLEX. Também foram analisados diferentes parâmetros no desempenho do Algoritmo Genético, na procura de valores para estes que garantissem soluções mais próximas das soluções obtidas pelo método exato, no menor tempo possível. As interações entre parâmetros foram consideradas significativas ou não, pelo teste F. Quanto à eficácia, a

resposta do Algoritmo Genético ficou a uma diferença máxima de 3,5% da solução exata. Quanto à eficiência, o tempo gasto pelo CPLEX foi bem inferior ao gasto pelo AG, porém a tendência é que aumentando o número de variáveis do problema, o tempo de processamento do CPLEX cresça de forma exponencial, e o tempo gasto pelo AG cresça em progressão menos acentuada, tornando-se inferior. Silva et. al (2009), explicam que o Algoritmo Genético toma como referência os processos de evolução natural de uma população, obedecendo leis naturais de mutação, *crossing-over*, e seleção natural.

Rodrigues et. al (2004) utilizam o Algoritmo Genético para solução de problemas de manejo florestal com restrições de integridade e afirmam que o algoritmo é uma técnica promissora para a solução de problemas combinatórios, como no caso da Programação Linear Inteira. Dentre os problemas que apresentam solução eficiente pelo Algoritmo Genético, os autores destacam: regulação florestal com escolha de um único talhão, problema de adjacência em talhões selecionados para colheita, seleção de rotas de transporte de madeira, seccionamento de toras, corte em indústria moveleira e corte de papel.

Ainda Rodrigues et. al (2004) evidenciam a utilização do Modelo I na formulação de alternativas de manejo necessárias à resolução do problema usando Algoritmo Genético. Em seu trabalho, as variáveis  $x_{ik}$  indicam a  $k$ -ésima alternativa de manejo adotada na  $i$ -ésima unidade de manejo. Para cada unidade de manejo foi permitida uma única alternativa de manejo. Dessa forma,  $x_{ik}$  assume valor 1 se a alternativa de manejo  $k$  for escolhida para a unidade de manejo  $i$  e zero caso contrário. Assim, as variáveis  $x_{ik}$  nesta aplicação, são binárias. A função objetivo, dada pelo somatório do valor presente líquido das unidades de manejo foi utilizada como função de aptidão, ou *fitness*, pelo AG. Restrições referentes à produção mínima e máxima de madeira por período também fizeram parte do modelo. Quatro problemas com quantidades de unidade de manejo, variáveis, e horizonte de planejamentos distintos foram solucionados pelo Algoritmo Genético que utilizou o Modelo I de Johnson e Scheurman. Os resultados obtidos foram avaliados por medidas de eficácia e eficiência. Para o problema de maior porte, a eficiência do Algoritmo Genético foi 5 vezes superior eficiência do algoritmo exato *Branch and Bound*.

A metaheurística *Simulated Annealing*, pode ser observada no trabalho desenvolvido por Rodrigues et. al (2004). Os autores explicam que *Simulated Annealing* é um algoritmo derivado de processos de recozimento de sólidos, e que o termo *Annealing* refere-se a um processo de resfriamento térmico que começa pela liquidificação de um cristal, à alta temperatura, seguido pela lenta e gradativa diminuição de sua temperatura até que o estado

sólido seja alcançado. Em seu trabalho, os autores compararam a solução obtida pelo SA com a obtida pelo algoritmo exato, testando eficácia e eficiência. A eficácia foi medida como a diferença percentual entre a solução obtida pelo SA e a solução do método exato. Observou-se boa eficácia e também que esta é grandemente influenciada pelos parâmetros. Na busca de melhores valores para os parâmetros, constatou-se que os mesmos devem ser adaptados para cada problema, não existindo assim, valores de parâmetros que possam aumentar ou diminuir a eficácia. Por medida de eficiência foi tomado o tempo computacional. *Simulated Annealing* apresentou boa eficiência para problemas de grande porte, pois foi 10 vezes mais rápido que o algoritmo exato *Branch and Bound*.

Ainda, Rodrigues et. al (2003) utilizaram a Busca Tabu para a solução de problemas de planejamento florestal com restrição de inteireza. O trabalho compara resultados obtidos pela Busca Tabu, com resultados exatos obtidos para o mesmo problema, onde a eficiência e eficácia foram observadas. Constatou-se medida de eficácia aceitável para problemas de pequeno e grande porte, pela diferença percentual entre o resultado exato e o apontado pela BT, que não excedeu 10%. A Busca Tabu mostrou-se mais eficiente para maior número de variáveis, ou seja, quando o número de variáveis aumenta, o tempo de processamento para BT tende a ser menor que o do algoritmo *Branch and Bound*.

Falcão e Borges (2003) utilizaram o Modelo I de Johnson e Scheurman para a comparação e análise da eficácia de algumas heurísticas usadas no planejamento florestal de grande dimensão. As heurísticas comparadas foram: Algoritmo Genético, Busca Tabu, *Sequential Quenching and Tempering* e *Simulated Annealing*. O método de comparação consistiu em obter um planejamento com cada uma dessas heurísticas para duas florestas artificiais, e depois comparar esses resultados com o apontado pelo modelo de Programação Linear. O método para o qual os resultados se aproximassem mais do obtido da resolução do modelo de Programação Linear em cada caso foi considerado o mais eficaz. Duas florestas artificiais A e B foram criadas e simuladas para teste das heurísticas. A floresta A, foi considerada com 125.000 hectares e 20.000 unidades de gestão povoada de Pinheiro Bravo (*Pinus pinaster Ait*), sujeitos ao regime da silvicultura da Mata Nacional Leiria em Portugal (FALCÃO, 1997). Os períodos foram medidos em anos. O objetivo anual de produção foi de 930.000 m<sup>3</sup> de pinho com desvio permitido de 5% num horizonte de 70 anos. A floresta B considerada com 500.000 hectares, e 40.000 unidades de gestão povoada com eucalipto (*Eucalyptus globulus Labill*). O horizonte de planejamento foi de 25 anos e o objetivo anual de produção ficou em 5.500.000 m<sup>3</sup> com possibilidade de desvio de 5% desse valor. Para o caso da floresta A, *Sequential Quenching and Tempering* apresentou solução mais próxima do

método de Programação Linear, enquanto a Busca Tabu apresentou pior resultado. No caso da floresta B, a Busca Tabu encontrou solução mais próxima da solução do modelo de Programação Linear. Quanto ao tempo operacional, em comparação com a Programação Linear, *Simulated Annealing* apresentou os melhores resultados, enquanto Busca Tabu apresentou os piores. Para obtenção dos resultados para o modelo de Programação Linear foi utilizado o *software* CPLEX (ILOG, 1997), e para as heurísticas foi utilizada a linguagem de desenvolvimento *Microsoft Visual Basic 6.0*.

Métodos de resolução não exatos como as metaheurísticas são interessantes, porém, dentro do escopo deste trabalho será utilizado apenas o método simplex, de resolução exata.

#### **4. A LEGISLAÇÃO DA RESERVA FLORESTAL LEGAL**

Quando o assunto é Reserva Legal, além do Código Florestal Federal em vigência, as leis estaduais em vigor devem ser consideradas. No Paraná após o Decreto Estadual nº 387 foi instituído o SISLEG (Sistema de Manutenção, Recuperação e Proteção da Reserva Florestal Legal e Áreas de Preservação Permanente) em 1999. Alguns dos propósitos foram levar o Estado do Paraná a ter um índice mínimo de 20% de cobertura florestal, ampliar a cobertura florestal mínima pela manutenção dos remanescentes florestais nativos, com a finalidade de conservação da biodiversidade, entre outros. O SISLEG é de responsabilidade do Instituto Ambiental do Paraná (IAP).

Para a complementação do Decreto nº 387, ou seja, o SISLEG, foram publicados outros regimentos, tais como Decretos Estaduais, Portarias IAP, Resoluções SEMA, Instruções Normativas (IN) entre outros que serão tratados nesse capítulo.

##### **4.1. ÁREA DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE**

Para compreender a Reserva Legal, é necessário saber do que se trata a área de Preservação Permanente (APP). O SISLEG define a área de Preservação Permanente em termos do Código Florestal Federal. Dentre algumas áreas destinadas à preservação permanente, estão: as florestas e demais formas de vegetação ao longo de qualquer curso d'água; ao redor de lagoas, lagos, ou reservatórios d'água naturais ou artificiais, nascentes, olhos d'água; topo de morros, montes, montanhas, serras; encostas com declividade superior a 45°; e qualquer vegetação nativa em altitudes superiores a 1.800 metros. Ainda são consideradas APP's, florestas e outras vegetações naturais, que tenham objetivos específicos, tais como: atenuar a erosão das terras, fixar dunas, formar faixas de proteção ao longo das rodovias e ferrovias, proteger sítios de valor científico e histórico, asilar exemplares da fauna ou flora ameaçados de extinção, assegurar condições de bem-estar público, preservar os recursos hídricos, entre outros.

Tal área, de objetivos tão nobres, corre o risco de ser confundida com a área de Reserva Legal. A APP difere da ARL pelo fato de não permitir o manejo sustentável, exceto nas florestas do Patrimônio Indígena com a finalidade de subsistência das comunidades

indígenas. Enquanto a ARL deve estar presente em todas as propriedades rurais, a APP é instituída apenas nas áreas previstas por lei. Então, uma propriedade, pode ou não abrigar área de Preservação Permanente, mas certamente, deverá abrigar a uma área de mata nativa destinada à Reserva Legal.

#### 4.2. ÁREA DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE E ÁREA DE RESERVA LEGAL

Conforme a Lei Federal nº 8.171 de 1991, APP's e ARL's estão isentas de tributação e do pagamento do Imposto Territorial Rural. De acordo com o Decreto nº 3.320, o IAP está autorizado a emitir qualquer documento a uma propriedade rural, desde que comprove sua situação regular quanto as áreas de Reserva Legal e de Preservação Permanente.

As APP's e ARL's não correspondem ao mesmo espaço territorial. A única possibilidade da área de Preservação Permanente ser computada como Reserva Legal prevista pelo Código Florestal é nos casos em que a área total correspondente a ambas exceda: 80% da propriedade na Amazônia Legal; 50% das propriedades em qualquer região do país; e 25% da pequena propriedade. Além dessas condições, é necessário que a ARL esteja no mesmo imóvel que a APP que está sendo usada para compensação, e que não seja feito o manejo sustentável nas áreas de Preservação Permanente utilizadas para compensar a área de Reserva Legal.

Nos casos de ausência de mata nativa em área de Preservação Permanente, ou de Reserva Legal, a recuperação das mesmas é necessária.

#### 4.3. ÁREA DE RESERVA LEGAL

O Código Florestal do Paraná, relatado na lei nº 11.054 de 11 de janeiro de 1995, prevê uma área mínima de 20% da propriedade rural destinada à Reserva Legal, e ressalta, que a manutenção do tecido florestal fica à cargo do proprietário, sendo permitido o seu uso através de técnicas de manejo que não impliquem na exclusão dessa área.

Uma área, para ser Reserva Legal, no Estado do Paraná, deve estar em território paranaense, no mesmo bioma, bacia hidrográfica e região que a sua propriedade, conforme SISLEG. As regiões dentro do Estado são definidas pela autoridade florestal estadual (IAP), e a localização da ARL dentro da propriedade também deve ser aprovada pelo IAP. O Código Florestal Federal permite que a área de Reserva Legal seja em regime de condomínio entre

duas ou mais de uma propriedade, desde que os percentuais referentes a cada imóvel sejam respeitados e exista a aprovação do IAP.

A ARL deve ser averbada à margem da inscrição da matrícula do imóvel, no registro de imóveis competente, de acordo com o SISLEG. Se o proprietário quiser destinar à Reserva Legal uma área maior que a prevista por lei, isso deve constar na averbação. No caso de utilização de APP's como ARL's, essas áreas também serão averbadas como Reserva Legal, porém devem ficar discriminadas como de Preservação Permanente. Uma vez averbada a Reserva Legal, é vedada a alteração de sua destinação, sendo permitida outra averbação para realocação da área, desde que em mesmas proporções que a original, e em raras exceções quando aprovado pelo IAP. A averbação da ARL da pequena propriedade ou posse rural familiar é gratuita, devendo o Poder Público prestar apoio técnico e jurídico, quando necessário. Nos casos em que a Reserva Legal não tem o mínimo de 20% da área total do imóvel, será firmado o Termo de Compromisso de Conservação e Recuperação Florestal. Conforme o Decreto nº 3.320, tal termo deve ser averbado no Cartório de Registro de Imóveis, com prazo máximo de 90 dias e é aceito para demais trâmites legais.

#### 4.4. RECUPERAÇÃO DA ÁREA DE RESERVA LEGAL

Dentre as alternativas à recuperação da ARL, os Códigos Florestais Federal e Estadual permitem as seguintes opções: plantio de frações da área a cada período de tempo com espécies nativas; condução da regeneração natural; e compensação da ARL por outra área equivalente em importância ecológica, e em extensão, com o mesmo ecossistema, e na mesma microbacia.

A IN nº 5 de 2009 afirma que a recuperação da Reserva Legal dependerá de projeto técnico previamente aprovado pelo IAP.

##### 4.4.1. Compensação da área de Reserva Legal

O Decreto nº 3.320 define normas para a compensação da ARL explicadas a seguir.

O imóvel com Reserva Legal inferior à exigência mínima de 20%, poderá compensá-la em outro imóvel desde que as APP's em ambos os imóveis estejam preservadas ou em processo de restauração. O imóvel que irá ceder parte da sua área deve ter a sua ARL conservada e averbada, pertencer ao mesmo bioma, à mesma bacia hidrográfica e ao mesmo

grupo de municípios que o imóvel que irá compensar a Reserva Legal. A vegetação usada na compensação deve ser nativa.

Algumas sugestões de lugares propícios à compensação: áreas prioritárias para a implantação da Reserva Legal; áreas de Reserva Florestal Legal Coletiva Pública, pagando ao órgão gestor estadual ou municipal pela aquisição e recuperação; e área de Reserva Florestal Legal Coletiva Privada, que poderá a qualquer tempo ser transformada em Reserva Particular do Patrimônio Natural. Para um imóvel ser Reserva Legal Coletiva Pública ou Privada, deve ter a sua própria ARL e APP, e todo o remanescente dessas áreas é que deve ser cedido para compensação de outros imóveis.

O Código Florestal Federal ainda sugere que o proprietário fica desonerado, no período de 30 anos, do compromisso de restauração da ARL, quando este doar ao órgão ambiental competente, e este aprovar, alguma área: localizada no interior do Parque Nacional ou Estadual; Floresta Nacional; Reserva Extrativista; Reserva Biológica ou Estação Ecológica pendente de regularização fundiária.

Casos em que é vedada a compensação da Reserva Legal: se o proprietário, a partir da vigência da Medida Provisória nº 1.736-31, suprimiu total ou parcialmente floretas ou outras vegetações nativas sem autorização exigida por Lei; se o imóvel não possuir APP preservada ou em processo de restauração; ou estiver localizado em Corredores da Biodiversidade, áreas de Proteção Ambiental, entorno de unidades de conservação de proteção integral e nas áreas Prioritárias para Conservação Ambiental.

#### **4.4.2. Condução da regeneração natural**

A IN nº 5 de 2009, aponta as seguintes medidas para a condução da regeneração natural de espécies nativas: proteção mediante isolamento, adoção de controle e erradicação de espécies vegetais exóticas invasoras e medidas de prevenção, combate e controle do fogo e da erosão, quando necessário; prevenção e controle do acesso de animais domésticos; medidas para conservação e atração de animais nativos dispersores de sementes; e número de espécies e de indivíduos por hectare compatível com a fitofisionomia local. Nesses casos é possível considerar novas plantas a partir da rebrota, e as entrelinhas das espécies nativas poderão ser ocupadas com espécies herbáceas exóticas de adubação verde ou por cultivos anuais em no máximo até três anos após a implantação da Reserva Legal.



#### **4.4.3. Manejo sustentável da área de Reserva Legal**

Nos casos em que se pretende fazer o manejo sustentável da Reserva Legal, o Código Florestal Estadual afirma que o mesmo deve garantir a perpetuidade da ARL. A Resolução SEMA nº 045 de 2008, exige a apresentação do Plano de Recuperação e Manejo da ARL, constando além das informações sobre propriedade e proprietário, a lista de espécies a ser plantada, quantidade, cronograma de implantação, etapas e forma que serão removidas as árvores, porcentagens de árvores a serem removidas por corte, possíveis danos provocados, entre outros. A pequena propriedade está isenta de tal exigência.

O Código Florestal do Estado do Paraná dá à autoridade responsável, permissão para vistoria da ARL ao término do quinto período de execução do plano de manejo sustentável. Caso não seja constatada a existência da população média prevista, o plantio imediato dos indivíduos necessários a obtenção de tal população poderá ser exigido, ou realizado pela autoridade responsável com todos os custos cobrados do proprietário infrator. O SISLEG afirma que a supressão ilegal da ARL sujeita o proprietário a penalidades e a recompor a área em prazo e condições a serem estabelecidos pela autoridade florestal.

##### **4.4.3.1. Como proceder o manejo sustentável**

Para as pequenas propriedades (área máxima de 50 hectares) desenvolverem o manejo sustentável é permitido o plantio de árvores frutíferas ornamentais ou industriais, compostos por espécies exóticas, cultivadas em sistema intercalar ou consórcio com espécies nativas. A IN nº 5 de 2009, define espécie exótica como qualquer espécie fora de sua área natural de distribuição geográfica; e espécie nativa como a espécie que apresenta suas populações naturais dentro dos limites de sua distribuição geográfica, partindo de ecossistemas onde apresenta seus níveis de interação e controles demográficos. Para áreas de Reserva Legal sob regime de manejo não serão permitidas espécies da Lista Oficial de Espécies da Flora Brasileira ameaçadas de Extinção, das listas dos Estados, ou listas de proibição de corte, conforme IN nº 4 de 2009.

A Portaria IAP nº 157 afirma que nas áreas consideradas prioritárias para a implantação da Reserva Legal, não é permitido o uso de espécies exóticas. O SISLEG define como área prioritária: alguns corredores de biodiversidade; o entorno das unidades de conservação e proteção integral; o interior das Áreas de Proteção Ambiental; faixa de 5 km a partir de cada margem dos rios que compõem os Corredores da Biodiversidade.

A Resolução SEMA nº 045 explica como deve proceder o uso de espécies exóticas na recomposição da Reserva Legal. As exóticas devem ser usadas nas parcelas desprovidas de remanescentes de vegetação natural, temporariamente, devendo ser retiradas totalmente ao final do seu ciclo econômico. O Plano de Recuperação e Manejo Sustentável da área de Reserva Legal deve estar em dia, sendo utilizado o sistema multiestrata, com no mínimo 5 espécies arbóreas nativas, no máximo 1 exótica, e 200 indivíduos por hectare. As espécies exóticas poderão ser plantadas até a data limite de 31 de dezembro de 2018, depois dessa data é permitido apenas o plantio de espécies nativas.

#### 4.4.3.2. Colheita e transporte de produtos florestais da área de Reserva Legal

Para realizar o corte das exóticas na Reserva Legal, será necessária autorização do IAP, sob a condição de que o restante da ARL esteja sendo recuperada, de acordo com os prazos do Termo de Compromisso de Restauração e Conservação da Reserva Legal. A retirada das exóticas deve ser priorizada num ciclo que resguarde a função ambiental da área e que favoreça a regeneração de espécies nativas. A Portaria IAP nº 157 ainda prevê os casos em que a Reserva Legal era previamente ocupada por exóticas, e deve ser efetuada a substituição por povoamentos heterogêneos com nativas. Para tal é necessário o encaminhamento de um requerimento ao IAP, juntamente com dados pessoa física do proprietário e jurídica quando for o caso, comprovante de pagamento da taxa ambiental, matrícula do Cartório de Registro de Imóveis atualizada, e projeto técnico relativo ao uso das espécies exóticas arbóreas, do qual a pequena propriedade está isenta, devendo porém firmar proposta técnica. O corte raso das exóticas deverá ser autorizado pelo IAP mediante a comprovação do ganho ambiental no processo de recuperação da área.

A IN nº 3 de 2009 afirma que o corte e exploração de espécies nativas só pode ser realizado se comprovado o seu plantio. Em no máximo 60 dias após o plantio, o interessado deve fazer o cadastro junto ao órgão ambiental competente, informando além dos dados de identificação, a localização do imóvel e da ARL; o nome popular e científico das espécies nativas; o sistema de plantio adotado; a data ou período do plantio; o número de mudas e de sementes plantadas de cada espécie; entre outros. Essas informações ficam arquivadas no Cadastro de Espécies Nativas Plantadas ou Reflorestadas. Só poderá realizar a colheita, comercialização e transporte os detentores das espécies florestais nativas cadastradas junto ao IAP, desde que antes das realizações destas atividades notifiquem o IAP informando o

número do cadastro do plantio; quantidade das espécies a serem cortadas; volume de produtos e subprodutos a serem obtidos; e localização da área onde ocorrerá a colheita.

A comercialização direta ou indireta, é permitida quando autorizada pelo IAP, com a apresentação dos dados do proprietário e da posse; comprovante de posse; croqui da área a ser objeto do manejo; comprovação da averbação da Reserva Legal; entre outros.

A IN nº 4 de 2009 reforça ainda que o manejo não deve prejudicar a função ambiental da área, buscando práticas que minimizem os impactos sobre os indivíduos jovens, priorizando o corte das espécies nativas pioneiras que não ultrapasse 50% do número de indivíduos com Diâmetro na Altura do Peito acima de 5 cm de cada espécie. A coleta de subprodutos florestais tais como frutos, folhas e sementes é livre desde que respeitadas a época de maturação destes, os períodos de coleta e volumes fixados em regulamentos e limitações legais específicos e que sejam utilizadas técnicas que não coloquem em risco a sobrevivência de indivíduos da espécie coletada no caso de coleta de flores, cascas, óleos, resinas, cipós, bulbos, bambus, e raízes. Quando não há propósito comercial, algumas das seguintes atividades de exploração são livres de autorização, tais como: retirada de madeira, no máximo 15 metros cúbicos para lenha e 20 metros cúbicos para benfeitorias por propriedade ou por unidade familiar em caso de posse coletiva; coleta de produtos não madeireiros para fins de manutenção da família e produção de mudas, como sementes, castanhas e frutos.

O transporte dos produtos e subprodutos florestais madeireiros da Reserva Legal deverão ser acompanhados de autorização contendo: volume individual e total por espécie; identificação das espécies; justificativa de utilização; descrição dos subprodutos a serem gerados; o responsável pelo beneficiamento do produto; o responsável pelo transporte dos produtos e subprodutos; e o trajeto a ser percorrido. Será expedida pelo órgão ambiental competente a documentação que autorize o transporte e armazenamento dos produtos florestais coletados da ARL, com validade para o tempo necessário ao transporte ou armazenamento.

Além das autorizações que os proprietários necessitam para extração, comercialização e transporte de produtos florestais provindos de ARL's, as pessoas físicas ou jurídicas que as utilizarem como matéria-prima serão obrigadas a comprovar a origem de tais produtos.

A Lei Federal nº 6.514 trata das infrações contra o meio ambiente e prevê multa de R\$ 5.000,00 por hectare ou fração para quem desmatar, danificar, explorar sem autorização

florestas de vegetação nativa em área de Reserva Legal. Executar manejo sem autorização ocasiona multa de R\$ 1.000,00 por hectare ou fração.

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

Uma atenção especial será dada às pequenas propriedades, visto que para estas é permitido o manejo sustentável perpetuamente, com as devidas restrições previstas por lei de acordo com o Procedimento Operacional Padrão do Sistema de Manutenção, Recuperação, e Proteção da Reserva Legal e Áreas de Preservação Permanente (SISLEG). A modelagem matemática para possíveis manejos em pequenas propriedades localizadas na região sudoeste do Paraná é objeto de estudo neste trabalho. As soluções obtidas para os modelos buscaram garantir máximo Valor Presente Líquido (VPL) das diferentes combinações possíveis entre os 24 subsistemas pré-estabelecidos considerando todos os períodos de planejamento.

### 5.1. DADOS PARA O MODELO

O apoio na definição das restrições legais, bem como a elaboração dos subsistemas de manejo florestal, silvicultura das espécies, custos de produção, preço pago ao produtor e receita líquida anual foram realizadas pelo Engenheiro Florestal Filipe Marcel Vargas, pesquisador do Instituto Agrônômico do Paraná (IAPAR) da Unidade Regional de Pesquisa Sudoeste.

O IAPAR é o órgão que realiza pesquisas visando o desenvolvimento da agropecuária paranaense, gerando conhecimento científico e tecnológico. Ele é vinculado à Secretaria da Agricultura e do Abastecimento (SEAB), tem a sua sede em Londrina e Unidades Regionais de Pesquisa em Ponta Grossa, Curitiba, Paranavaí, Pato Branco e Santa Tereza D'oeste. No município de Pato Branco, o IAPAR conta com uma área de 232,8 hectares, onde há uma estação experimental, uma estação agrometereológica e um laboratório de análise de solo. As pesquisas que são realizadas na Unidade Regional de Pato Branco, incluem assuntos como: caprinocultura, culturas de feijão, milho e trigo, integração lavoura e pecuária, manejo e conservação do solo, plantas potenciais para biodiesel e manejo florestal. Também há produção de sementes de aveia, feijão, adubo verde, entre outras.

### 5.1.1. Espécies

Além da classificação em espécies nativas e exóticas, as espécies podem ser classificadas em pioneiras, secundárias e clímax. Sobre as diferenças, Almeida (2010) explica que plantas pioneiras, também conhecidas como primárias, têm crescimento rápido, tempo de vida curto na floresta, por volta de 6 a 15 anos, e geralmente têm porte alto crescendo em contato direto com o sol. Estas plantas fazem uma camada encobrindo o sol, o que favorece o crescimento das secundárias. As secundárias desenvolvem-se na fase intermediária de formação da floresta, pois necessitam de sombra para o seu crescimento na fase inicial. Possuem crescimento mais lento que as pioneiras, e vivem de 15 a 20 anos na floresta. Finalmente, as plantas clímax, têm seu desenvolvimento quando a floresta já está formada, e podem atingir até 100 anos de vida na floresta.

Este trabalho prevê o planejamento do manejo florestal de uma área de Reserva Legal que esteja completamente desmatada, sendo necessário iniciar a sua recomposição com vegetação primária, depois secundária, e então clímax. Os modelos simulados consideram alguns períodos possíveis para o plantio dessas plantas. Tal reconstituição da cobertura florestal através de plantio de mudas ou semeaduras feitas pelo homem é chamada de regeneração artificial (FLOR, 1985).

Uma opção de manejo, para uma determinada espécie, deve indicar o espaçamento entre as mudas, o número de mudas por hectare, o período em que as colheitas devem ser feitas, a quantidade de plantas a serem colhidas no período de corte e podas, entre outros aspectos. Tal regime influencia diretamente o crescimento das árvores, e por consequência, a quantidade e a qualidade do produto florestal produzido. FLOR (1985), explica que as árvores adultas competem entre si pela sobrevivência, por água, nutrientes, luz do sol, entre outros recursos. Nessa competição, umas espécies prejudicam as outras, fazendo-as adoecer, perder o volume, e comprometer o produto a ser colhido. Por isso, os desbastes são necessários, ou seja, a remoção do excesso de fustes em fase de crescimento, com o objetivo de diminuir a condição excessiva e adversa, proporcionando maiores espaços que garantam o aumento da produção.

As características de cada uma das espécies utilizadas nos modelos serão apresentadas a seguir. Antes porém, vale esclarecer alguns termos técnicos.

Diâmetro à Altura do Peito (DAP), é a medida do diâmetro da árvore com casca na altura do peito. De acordo com SOARES et. al (2006), os instrumentos de medição de diâmetro são de fácil manuseio e as deformações na base dos fustes das árvores são reduzidas

à altura do peito. Tal medida de altura é padronizada com base no Sistema Internacional de Medidas, sendo 1,30 m no Brasil, 1,37m nos Estados Unidos e 1,29m na Inglaterra e outros países europeus. O DAP é utilizado para calcular a área basal do povoamento florestal.

Fuste, de acordo com Wikipédia é uma palavra derivada do latim, e significa “pau de madeira”. É a parte em que o tronco tem praticamente o mesmo diâmetro em toda a sua extensão. SOARES et. al (2006), explica, que o fuste está compreendido entre o solo e o começo da copa, e pode ser visto na Figura 3.

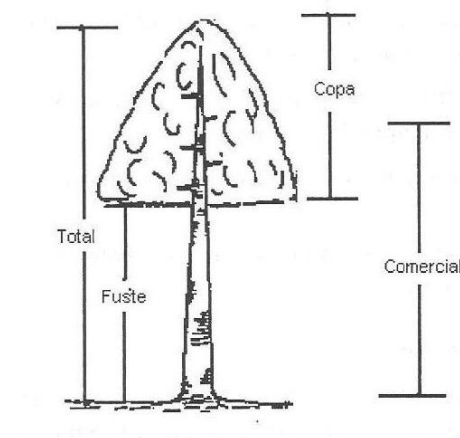


FIGURA 2: FUSTE  
FONTE: SOARES (2006)

Dependendo da espécie, da idade e do espaçamento entre as árvores, os fustes podem assumir diferentes formas, assemelhando-se aos sólidos de revolução: cone, parabolóide, neilóide, e cilindro. É possível que mais de uma dessas formas estejam presentes em um mesmo fuste. O formato do fuste influencia no volume de madeira produzido e consequentemente no lucro a ser obtido.

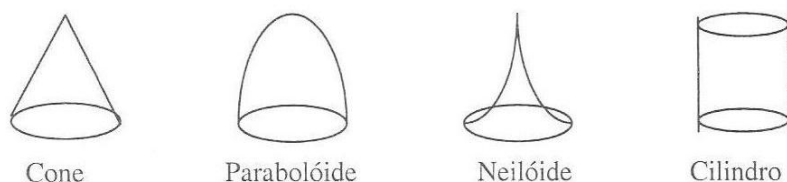


FIGURA 3: FORMATOS DOS FUSTES  
FONTE: SOARES (2006)

Para a medição do volume de madeira a ser comercializado, geralmente é considerada a pilha de madeira. O Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO), define como volume estéreo o volume da pilha de madeira

roliça, onde estão incluídos os espaços vazios entre as toras, que variam em área seccional, curvatura e forma.

O espaçamento entre as árvores considerado nos sistemas de manejo é dado da seguinte forma: comprimento x largura. Onde tanto o comprimento como a largura são medidos em metros. As duas grandezas são dadas como as duas dimensões de um retângulo como se cada árvore se encontrasse em um vértice do retângulo. Assim, se um espaçamento for 2 x 3, por exemplo, a distância no sentido do comprimento entre as árvores será de 2 metros, e no sentido da largura será de 3 metros.

Os dados utilizados, no que se referem à produção e lucro, estão considerando a quantidade de madeira produzida em metros cúbicos por hectare. Os preços são pagos por metros cúbicos da madeira, sendo que um metro cúbico é aproximadamente 70% de um metro estéreo. Em tratando-se de espécies nativas e exóticas, nem todas têm descritas a sua função de crescimento, nem o formato do fuste, o que dificulta o cálculo do volume produzido após um desbaste. Para esses casos foram consideradas outras espécies que têm crescimento e fuste parecidos com as das espécies nativas e exóticas a fim de estimar alguns valores. Os produtos de comercialização informal, que não possuem preço de mercado bem definido, tiveram seus valores de venda pesquisados junto a agricultores e compradores da região. O modelo prevê que todo o volume de madeira e de outros produtos florestais colhidos da Reserva Legal serão vendidos.

Uma prévia a respeito de cada espécie é dada a seguir. A maioria das informações sobre as espécies nativas foram obtidas no site da EMBRAPA.

#### 5.1.1.1. Eucalipto – *Eucalyptus grandis*

Todas as espécies do gênero “eucalipto” recebem o nome eucalipto. De acordo com GALETI (1973), o eucalipto é original da Austrália, onde são encontradas mais de 500 espécies diferentes, e foi trazido para o Brasil por Edmundo Navarro de Andrade (Engenheiro Agrônomo, chefe do Serviço Florestal da Companhia Paulista de Estradas de Ferro de 1903 a 1941) em 1909, portanto é considerada uma espécie exótica. O eucalipto mostra-se eficaz para a arborização, pois em suas mais variadas espécies, existem as que vivem em solos úmidos, em solos secos, em solos pobres, ricos e solos com alagamento. Pode ser plantado em praticamente todas as condições de solo e climáticas que podem existir. Também o *Eucalyptus Grandis*, adapta-se em regiões de clima temperado, com freqüentes geadas e



inverno chuvoso. A sua madeira é útil para postes, mourões, lenha e carvão. É uma planta pioneira, como toda espécie exótica.

O trabalho considera três regimes de manejo para a espécie, com 3.333, 1.667, 1.111 mudas por hectare, sendo os espaçamentos, de 1,5 x 2, 2 x 3 e 3 x 3 e desbastes aos 4 e 9, 5 e 9 e 6 e 9 anos respectivamente.

#### 5.1.1.2. Nogueira – *Carya illinoensis*

Também conhecida como nogueira pecã, é natural do sul dos Estados Unidos e foi trazida por americanos ao Brasil por volta do ano de 1900. É portanto uma espécie exótica. É pioneira e vive por muito tempo, podendo dar frutos durante 200 anos aproximadamente. Seu principal produto, que está sendo considerado neste trabalho, são as nozes consumidas “in natura”, e utilizadas nas confeitarias. A nogueira pode atingir de 25 a 40 m de altura.

No trabalho estão sendo considerados os manejos de espaçamentos 10 x 10 e 15 x 15, com 100 e 44 espécies por hectare respectivamente.

#### 5.1.1.3. Bracatinga – *Mimosa scabrella*

Espécie nativa brasileira, com ocorrência no sul do Paraná, no nordeste do Rio Grande do Sul, no centro sul de Santa Catarina e no centro sul e leste de São Paulo. Apresenta crescimento inicial mais rápido e baixa longevidade, pois é pioneira. Pode ter de 5 a 15 m de altura e DAP de 20 a 40 cm, e em idade adulta atinge até 20 m de altura e um DAP de 60 cm. O tronco é reto ou levemente tortuoso, com fuste de até 10 m de comprimento.

É recomendada para a conservação de solos, para a recuperação de solos degradados.

No trabalho, serão consideradas três formas de manejo florestal para a Bracatinga: espaçamento 2 x 1 e 5.000 mudas por hectare, espaçamento 2 x 1,5 e 3.333 mudas por hectare e espaçamento 2,5 x 2 e 2.000 mudas por hectare. As podas, nos três casos, são feitas no terceiro e no sétimo anos. Os principais produtos provenientes da Bracatinga são lenha e carvão, além de ser útil na construção civil, como viga, escora, entre outros.

#### 5.1.1.4. Louro – *Cordia trichotoma*

Espécie nativa, com origem em praticamente todo o território brasileiro e América do Sul, popularmente conhecida como Louro Pardo. É uma árvore secundária inicial, atingindo

de 8 a 20 m de altura e DAP de 40 a 60 cm. Na idade adulta pode chegar a uma altura de 35 m com 100 cm de DAP. Seu crescimento é lento e moderado, apresentando fuste bem definido, com 15 m. É recomendada para reflorestamento, pois possui boa deposição de folheto, e pode ser utilizada para arborização em praças em zona urbana. Sua madeira é indicada na construção de móveis de luxo, na construção civil, marcenaria, carpintaria, e não serve para lenha.

Dois tipos de manejo foram considerados para o Louro Pardo: espaçamento 3 x 3 e 1.111 mudas no hectare com podas no oitavo e vigésimo quinto anos, e espaçamento 3 x 5 com 667 mudas num hectare e podas no décimo segundo e vigésimo quinto anos.

#### 5.1.1.5. Erva-mate – *Ilex paraguariensis*

É encontrada naturalmente em algumas regiões do Uruguai e do Paraguai. No Brasil tem ocorrência nos estados de Santa Catarina, Paraná, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, São Paulo e Rio de Janeiro. Árvore clímax, cresce sob a sombra, tem altura de 3 a 5 m podendo chegar até 30 m na floresta e seu DAP é de 100 cm. É de curto fuste, mas nas suas maiores alturas pode apresentar 11 m de fuste. Seu principal produto são as folhas, seu crescimento é lento, sendo os 50 anos uma boa idade para a colheita da madeira, que produz lâmina de boa qualidade. Também serve para reflorestamento em mata ciliar, onde não ocorram inundações.

O produto considerado para a colheita da erva-mate são as folhas. O início de sua colheita pode ser no terceiro ano de idade da espécie, e o regime de manejo único previu o espaçamento entre as mudas de 3 x 3, o que corresponde a um total de 1.111 mudas por hectare.

#### 5.1.1.6. Araucária – *Araucária angustifolia*

A Araucária é uma espécie nativa e de acordo com a Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná, concentra-se na região sul do país, no sul do Estado de São Paulo e na Serra da Mantiqueira. Ou seja, cresce em regiões em que as estações do ano são bem definidas, com ocorrência de chuvas, geadas e inverno rigoroso. Nas matas virgens de São Joaquim, Curitiba e Chapecó, encontram-se árvores com 30 m de altura e diâmetros na altura do peito de 1 a 1,5 m.

Para a araucária, foram considerados três regimes de manejo com 400, 1.111 e 1.667 mudas por hectare, sendo os espaçamentos 5 x 5, 3 x 3 e 3 x 2, e colheitas feitas no ano 18 e 30, 16 e 30 e 12 e 30 respectivamente.

#### 5.1.1.7. Jabuticaba – *Myrciaria cauliflora*

Espécie nativa da mata atlântica e presente em vários estados do Brasil, tais como os da região sul, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo e Goiás. É uma espécie secundária, podendo chegar até 15 m de comprimento, com tronco de até 40 cm de diâmetro. O seu principal produto é o fruto, demorando cerca de 10 anos para a primeira frutificação. Seu cultivo é indicado para quintais e pomares, pois o fruto azeda rapidamente, tornando-se inviável o cultivo em grandes pomares.

A forma de manejo que está sendo considerada para a jabuticaba, é o de plantio de 400 mudas por hectare, com espaçamento 5 x 5 e frutos colhidos a partir do décimo segundo ano.

#### 5.1.1.8. Goiabeira serrana – *Acca sellowiana*

Originária das terras altas do sul do Brasil, Uruguai e Argentina. Adapta-se a ambientes de quentes-temperados a subtropicais, necessitando de alguns dias de frio para frutificar. É espécie pioneira, atingindo de 1 a 7 m de altura e o seu principal produto é o fruto.

No trabalho, está sendo considerado o manejo com espaçamento de 5 x 5, com 400 mudas por hectare e colheita do fruto a partir do quinto ano.

#### 5.1.1.9. Louro-branco – *Bastardiopsis densiflora*

Ocorre de forma natural no Brasil na região sul, nos estados de Espírito Santo, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais e São Paulo. É uma espécie que se comporta com característica de secundária e de pioneira, com fuste cilíndrico quase reto podendo chegar até 12 m. Sua altura varia de 5 a 15 m, podendo chegar aos 25 m, e o seu DAP é de 20 a 40 cm, podendo chegar a 82 cm. De acordo com Carvalho (2003), a madeira do louro branco é útil em acabamentos internos, em construção civil, na carpintaria, confecção de portas, peças torneadas e cabos de vassoura. É produtora de celulose e uma das poucas que floresce no

inverno. Por isso, favorece a produção de mel nessa estação. Não produz lenha de boa qualidade. É indicada para restauração da mata ciliar, pois suporta encharcamento e inundações moderadas.

O regime de manejo para esta espécie considera espaçamento 3 x 4 com o plantio de 833 mudas por hectare, sendo os desbastes feitos no décimo segundo e vigésimo oitavo anos.

#### 5.1.1.10. Imbuia – *Ocotea porosa*

Espécie natural do Brasil, da região sul e dos estados de Goiás, Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo. É clímax, mas às vezes se comporta como secundária, e pode chegar a 500 anos. Varia de 10 a 20 m de altura, podendo chegar aos 30 m, e o seu DAP varia entre 50 e 150 cm, podendo chegar a mais de 320 cm em idade adulta. Seu tronco é torto e irregular e seu fuste é, em geral, de 6 m de comprimento. Sua madeira pode ser usada em mobiliário de luxo, e por este motivo é apreciada mundialmente. Também é útil na construção civil, carpintaria, marcenaria, fabricação de esquadrias e instrumentos musicais, entre outros. Por destilação, produz óleo utilizado na perfumaria. Não produz boa lenha, nem celulose. É indicada para reflorestamento em mata ciliar, onde não ocorram inundações.

A colheita da Imbuia neste trabalho se refere à extração de madeira. Um único regime de manejo foi utilizado e considera espaçamento 2 x 4 e 1.250 árvores por hectare, sendo as colheitas feitas no décimo segundo e no vigésimo oitavo anos.

#### 5.1.1.11. Canela-preta – *Ocotea catharinensis*

Espécie secundária, natural da região sul do país e dos estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro. Ainda, é a terceira em volume no Paraná e em Santa Catarina. Possui de 10 a 25 m de altura, podendo chegar a 45 m de altura. O seu DAP varia de 60 a 100 cm podendo chegar a 150 cm. Produz lenha de boa qualidade e sua madeira é indicada para a fabricação de móveis, assoalhos, painéis. Também é empregado na marcenaria, na construção civil e naval e o óleo de sua casca é utilizado na fabricação de cosméticos. É de grande importância medicinal, sendo que os índios do Paraná e Santa Catarina usam a casca e o caule como fortificante para as gestantes. O plantio dessa espécie é recomendado na recuperação de ecossistemas degradados.

No trabalho está sendo considerado o tipo de manejo, em que o número de mudas por hectare é de 1.667, o espaçamento entre as mudas é de 2 x 3 e os desbastes são feitos no sétimo, no décimo segundo e no vigésimo anos.

#### 5.1.1.12. Angico-branco – *Anadenanthera colubrina*

Ocorre naturalmente no Brasil, nos estados da Bahia, Espírito Santo, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Piauí, Rio de Janeiro, São Paulo e Paraná. É árvore secundária e sua altura varia de 10 a 20 m, podendo chegar a 35 m. Seu DAP é de 30 a 60 cm podendo chegar a 100 cm. Seu fuste atinge o máximo de 12 m. É indicada para a recuperação de terrenos em que houve erosão, e para a recuperação da mata ciliar, onde há inundação. Seus produtos são madeira e goma.

O plantio considerado dá-se com espaçamento 2 x 3, com 1.667 mudas em um hectare. As colheitas são feitas no sétimo e no décimo segundo anos.

#### 5.1.1.13. Canela-branca – *Nectandra lanceolata*

É encontrada em outros estados do Brasil, mas, ocorre naturalmente no Paraná. É árvore secundária, com altura variando de 10 a 15 m podendo atingir um máximo de 25 m. Seu DAP é entre 20 e 50 cm podendo atingir um máximo de 120 cm, com fuste chegando até 8 m. Sua madeira é utilizada na construção civil como caibro, forro, ripas, esquadrias entre outros. Também produz lenha e carvão de boa qualidade.

Quanto ao manejo, o espaçamento foi de 2 x 3 totalizando 1.667 espécies por hectare, e desbastes feitos nos sétimo e décimo segundo anos.

#### 5.1.1.14. Maricá – *Mimosa bimucronata*

Ocorre no Brasil em vários estados, dentre eles o Paraná. Adapta-se a climas tropicais, subtropicais úmidos, e temperados úmidos. É espécie pioneira, podendo atingir de 3 a 10 m de altura e com algumas exceções 15 m. Tem um DAP de 10 a 25 cm, podendo atingir 40 cm. Seu tronco é curto, cheio de ramificações e multitrancos. Sua madeira pode ser usada na marcenaria, e produz lenha de boa qualidade que queima mesmo quando verde.

No trabalho, o manejo escolhido para o Maricá considera espaçamento 2 x 2, com 2.500 mudas por hectare e colheitas no terceiro e sétimo anos.

#### 5.1.1.15. Canjarana – *Cabralea canjerana*

É de ocorrência natural de vários estados do Brasil, inclusive no Paraná. Árvore secundária, com DAP variando de 20 a 50 cm, podendo chegar a 230 cm. A altura varia de 5 a 20 m podendo chegar a 35 m, com fuste de até 13 m de comprimento. A madeira é utilizada na estrutura de móveis, marcenaria, carpintaria, e na construção civil é utilizada nos acabamentos internos. Também produz lenha de qualidade razoável. O suco dos frutos pode ser utilizado como inseticida e das flores é extraído o perfume.

No trabalho é considerada a venda da madeira, e no manejo único, o espaçamento entre as mudas foi de 2 x 3, totalizando 1.667 mudas em um hectare, e as colheitas são feitas ao sétimo e ao décimo segundo anos.

#### 5.1.1.16. Grápia – *Apuleia leiocarpa*

Ocorre naturalmente em todo o território nacional. É uma espécie que comporta-se como secundária e também como pioneira. No nordeste atinge 15 m de altura, no sudeste 20 m, na região sul 35 m e na mata amazônica chega aos 40 m. Seu DAP varia em torno de 100 cm para as plantas mais altas. Sua madeira é indicada para estruturas externas, postes, mourões, esquadrias, assoalhos, forros, marcenaria, e é considerada a melhor madeira para a construção de carrocerias de caminhões por ser resistente a constantes mudanças de chuva e sol e também produz celulose de grande qualidade. O plantio é recomendado para reposição de mata ciliar e para arborização de praças. Está sendo considerado o manejo com colheitas aos oitavo, décimo sexto e trigésimo anos, com 1.111 mudas por hectares e espaçamento 3 x 3.

O quadro a seguir apresenta os regimes de manejo de cada espécie para um período de 30 anos. Na enumeração do regime, a primeira coluna refere-se ao total de regimes, e a segunda aos regimes por espécie. Procurou-se considerar as restrições impostas por lei, por exemplo, não ser permitido o corte de mais de 50% das espécies nativas pioneiras da reserva de uma única vez. O quadro com os fluxos de caixa para cada um dos respectivos regimes de manejo apresentados no QUADRO 2 a seguir se encontra no ANEXO A. O quadro com a quantidade de plantas em um hectare para cada um dos regimes está no ANEXO B.

REGIMES DE MANEJO														
Regime nº	Dados das espécies				Espaçamento				Colheitas de Madeira					
	Espécie	Nome científico	Origem	Sucessão Ecol.	Produto	Comp. (m)	Largura (m)	un./ha	ano	un. rem.	ano	un. rem.	ano	un. rem.
1	Eucalipto	<i>Eucalyptus</i> sp.	exótica	pioneira	madeira	1,5	2	3333	4	670	9	270	20	0
2	Eucalipto	<i>Eucalyptus</i> sp.	exótica	pioneira	madeira	2	3	1667	5	550	9	220	20	0
3	Eucalipto	<i>Eucalyptus</i> sp.	exótica	pioneira	madeira	3	3	1111	6	370	9	150	20	0
4	Nogueira	<i>Carya illinoensis</i>	exótica	pioneira	fruto	10	10	100	*					
5	Nogueira	<i>Carya illinoensis</i>	exótica	pioneira	fruto	15	15	44	*					
6	Bracatinga	<i>Mimosa scabrella</i>	nativa	pioneira	madeira	2	1	5000	3	3333	7	0		
7	Bracatinga	<i>Mimosa scabrella</i>	nativa	pioneira	madeira	2	1,5	3333	3	1667	7	0		
8	Bracatinga	<i>Mimosa scabrella</i>	nativa	pioneira	madeira	2,5	2	2000	3	1111	7	0		
9	Louro	<i>Cordia trichotoma</i>	nativa	secundária	madeira	3	3	1111	8	277	25	0		
10	Louro	<i>Cordia trichotoma</i>	nativa	secundária	madeira	3	5	667	12	277	25	0		
11	Erva-mate	<i>Ilex paraguariensis</i>	nativa	climax	folha	3	3	1111	**					
12	Araucária	<i>Araucária angustifolia</i>	nativa	pioneira	madeira	5	5	400	18	240	30	0		
13	Araucária	<i>Araucária angustifolia</i>	nativa	pioneira	madeira	3	3	1111	16	820	30	0		
14	Araucária	<i>Araucária angustifolia</i>	nativa	pioneira	madeira	3	2	1667	12	990	30	0		
15	Imbuia	<i>Ocotea porosa</i>	nativa	climax	madeira	2	4	1250	12	840	28	0		
16	Jabuticaba	<i>Myrciaria jaboticaba</i>	nativa	secundária	fruto	5	5	400	***					
17	Goiabeira serrana	<i>Acca sellowiana</i>	nativa	pioneira	fruto	5	5	400	****					
18	Louro-branco	<i>Bastardiopsis densiflora</i>	nativa	pioneira/secundária	madeira	3	4	833	12	420	28	0		
19	Canela-preta	<i>Nectandra megapotamica</i>	nativa	secundária	madeira	2	3	1667	7	1250	12	625	24	0
20	Angico-branco	<i>Anadenanthera colubrina</i>	nativa	secundária	madeira	2	3	1667	7	1250	12	625	20	0
21	Canela-branca	<i>Nectandra lanceolata</i>	nativa	secundária	madeira	2	3	1667	7	1250	12	625	20	0
22	Maricá	<i>Mimosa bimucronata</i>	nativa	pioneira	madeira	2	2	2500	3	1500	7	0		
23	Canjarana	<i>Cabralea canjerana</i>	nativa	secundária	madeira	2	3	1667	7	1250	12	625	20	0
24	Grápia	<i>Apuleia leiocarpa</i>	nativa	pioneira/secundária	madeira	3	3	1111	8	834	16	555	30	0

\* Colheita do fruto a partir do terceiro ano após o plantio.

\*\* Colheita da folha a partir do quarto ano após o plantio.

\*\*\* Colheita do fruto a partir do décimo segundo ano após o plantio.

\*\*\*\* Colheita do fruto a partir do quinto ano após o plantio.

QUADRO 2: REGIMES DE MANEJO FLORESTAL  
FONTE: VAR GAS (2010)

## 5.2. MODELAGEM

O modelo foi organizado através dos seguintes índices, conjuntos, parâmetros e variáveis.

### Índices

- $e$  - representa o número da espécie,  $e = 1, 2, \dots, E$
- $m$  - representa o número do manejo da espécie  $e$ ,  $m = 1, 2, \dots, M_e$
- $p$  - representa o número do período,  $p = 1, 2, \dots, P$
- $pi$  - representa o número do período de início do plantio,  $pi = 1, 2, \dots, P$

### Conjuntos

- $CEE$  - conjunto das espécies exóticas;
- $CEN$  - conjunto das espécies nativas;
- $CM_e$  - conjunto dos manejos das espécies  $e$ ;
- $CP$  - conjunto dos períodos.

### Parâmetros

- $VPL_{e,m,pi}$  - Valor Presente Líquido (R\$) obtido do plantio da espécie  $e$ , sob regime de manejo  $m$ , iniciando o seu ciclo econômico no período  $pi$ ;
- $Amin_e$  - porcentagem de área mínima permitida para plantio da espécie  $e$ ;
- $Amax_e$  - porcentagem de área máxima permitida para plantio da espécie  $e$ ;
- $Mmin_p$  - quantidade mínima (unidades) de plantas por hectare exigida no período  $p$ ;
- $Bmin_p$  - quantidade mínima (unidades/ha) de espécies permitidas no período  $p$ ;
- $Lmin_p$  - receita líquida mínima (R\$/ha) exigida por hectare no período  $p$ ;
- $a_{e,m,p,pi} = \begin{cases} 1, \text{ se } p \text{ for um período do ciclo econômico da espécie } e \text{ sob regime de manejo } m \text{ iniciando seu ciclo econômico no período } pi \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$
- $vp_{e,m,p,pi} = \begin{cases} vp, \text{ valor presente da espécie } e \text{ sob regime de manejo } m \text{ no período } p \text{ que inicia o seu ciclo econômico no período } pi \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$
- $q_{e,m,p,pi} = \begin{cases} \text{quantidade de plantas por hectare se } p \text{ for período do ciclo econômico da espécie } e \text{ sob regime de manejo } m \text{ iniciando o seu plantio no período } pi \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$



### Variáveis

$x_{e,m,pi}$  - porcentagem de um hectare ocupado pela espécie  $e$  sob regime de manejo  $m$  iniciando o ciclo econômico no período  $pi$

$$y_{e,m,pi} = \begin{cases} 1, & \text{se a espécie } e \text{ sob regime de manejo } m \text{ inicia seu ciclo econômico no período } pi \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Foram consideradas propriedades com área menor que 50 hectares, tratadas como pequenas propriedades. Com o intuito de descrever o manejo florestal para propriedades de diversos tamanhos, os cálculos serão feitos para uma área correspondente a um hectare, e após a obtenção dos resultados, os valores devem ser multiplicados pela quantidade de hectares da propriedade. Sendo assim, as variáveis  $x_{e,m,pi}$  podem assumir qualquer valor real, entre zero e um, sendo que o valor 1 significa a ocupação total da área da Reserva Legal.

#### 5.2.1. Função objetivo

O objetivo do modelo é obter sistemas de manejo que garantam o maior Valor Presente Líquido atendendo determinadas restrições.

De posse dos fluxos de caixa para cada uma das espécies, com manejos distintos, iniciando em períodos distintos foi calculado o Valor Presente Líquido (VPL) referente a um hectare, no período de 30 anos. O somatório do produto dos percentuais de área pelo seu VPL corresponde ao valor da função objetivo, que deve ser maximizado.

$$\text{Maximizar} \sum_{e \in (CEE \cup CEN)} \sum_{m \in CM_e} \sum_{pi \in CP} VPL_{e,m,pi} \cdot x_{e,m,pi} \quad (5.1)$$

#### 5.2.2. Restrições

##### ➤ Quantidade de espécies por período

É desejável que o modelo apresente em sua solução, um número de espécies nativas que supere um determinado valor  $B \min_p$  que pode ser distinto a cada período. O somatório do produto dos parâmetros  $a_{e,m,p,pi}$  pelas variáveis binárias  $y_{e,m,pi}$  deve ser maior ou igual ao valor mínimo de espécies  $B \min_p$ . Como a espécie com início de seu cultivo em um período  $pi$  permanece no solo durante mais alguns anos, as restrições que sucedem o período de início da espécie mantém no seu somatório a variável  $y_{e,m,pi}$  em todos os períodos, até o final

do ciclo econômico. Os anos em que a espécie permanece no solo determinam o ciclo econômico. Também é permitida, mas não obrigatória, a escolha de uma espécie exótica, além do mínimo exigido de nativas  $B \min_p$ .

$$\sum_{e \in CEN} \sum_{m \in CM_e} \sum_{pi \in CP} a_{e,m,p,pi} \cdot y_{e,m,pi} \geq B \min_p \quad \forall p \in CP \quad (5.2)$$

➤ Área total

Nesta restrição o somatório dos valores de  $x_{e,m,pi}$  por período, não deve exceder uma unidade. Vale lembrar que as variáveis  $x_{e,m,pi}$  assumem valores reais correspondentes à porcentagem de área que o modelo aponte como solução para ser destinada à espécie  $e$ , sob regime de manejo  $m$  iniciando no período  $pi$ . Da mesma forma que para a restrição anterior, é necessário considerar todos os períodos do ciclo econômico de cada espécie sob cada regime de manejo.

$$\sum_{e \in (CEE \cup CEN)} \sum_{m \in CM_e} \sum_{pi \in CP} a_{e,m,p,pi} \cdot x_{e,m,pi} \leq 1 \quad \forall p \in CP \quad (5.3)$$

➤ Espécies exóticas cultivadas por período

Não é permitido que em um mesmo período, duas espécies exóticas que tenham sido escolhidas estejam cumprindo o seu ciclo econômico. Apenas uma exótica é permitida por período. Portanto, uma exótica não pode iniciar o seu ciclo econômico antes de outra exótica selecionada ter findado o seu ciclo. Se  $e \in CEE$  são as plantas exóticas consideradas pelo modelo, então a restrição a seguir garantirá que as exóticas são mutuamente excludentes por período.

$$\sum_{e \in CEE} \sum_{m \in CM_e} \sum_{pi \in CP} a_{e,m,p,pi} \cdot y_{e,m,pi} \leq 1 \quad \forall p \in CP \quad (5.4)$$

➤ Manejos distintos para a mesma espécie

Sendo uma espécie  $e$  selecionada sob um regime de manejo  $m$ , não é permitido que a mesma espécie com outro regime de manejo seja selecionada até findar o ciclo econômico da anterior. Caso contrário, uma área muito grande poderá estar sendo destinada a uma única espécie e as operações de manejos dificultadas. Principalmente, se o período de início do ciclo econômico de ambas for próximo. Em se tratando de área de Reserva Legal é necessária a garantia de diversidade de espécies. A restrição abaixo impõe que as variáveis binárias

referentes a cada espécie, para todos os regimes de manejo possíveis, considerando os ciclos econômicos, sejam mutuamente excludentes por período. Para espécies que apresentam apenas um regime de manejo, tal restrição é desnecessária.

$$\sum_{m \in CM_e} \sum_{pi \in CP} a_{e,m,p,pi} \cdot y_{e,m,pi} \leq 1 \quad \forall e \in (CEE \cup CEN); p \in CP \quad (5.5)$$

- A mesma espécie exótica não pode ser selecionada mais de uma vez

Quando uma espécie exótica é selecionada pelo modelo e cumpre o seu ciclo econômico, nos períodos que o sucedem não é permitido que ela seja novamente selecionada. O somatório das variáveis  $y_{e,m,pi}$  para todos os manejos de cada espécie exótica em todos os períodos deve ser menor ou igual a um, ou seja, elas são mutuamente excludentes.

$$\sum_{m \in CM_e} \sum_{pi \in CP} y_{e,m,pi} \leq 1 \quad \forall e \in CEE \quad (5.6)$$

- O início de um regime de manejo que já esteja em execução não é permitido

Se uma espécie  $e$ , sob um regime de manejo  $m$  tem o seu plantio indicado para o período  $pi$ , ela não deve ser plantada novamente com o mesmo regime de manejo  $m$  até que o ciclo econômico anteriormente iniciado se complete. Tal restrição não é necessária para as espécies exóticas, visto que a repetição de uma exótica no decorrer de todo o período de planejamento não é permitida, o que já foi contemplado anteriormente.

$$\sum_{pi \in CP} a_{e,m,p,pi} \cdot y_{e,m,pi} \leq 1 \quad \forall e \in CEN; p \in CP; m \in CM_e \quad (5.7)$$

- A variável  $x_{e,m,pi}$  é valorizada apenas se  $y_{e,m,pi}$  for igual 1

Para que seja computada uma porcentagem de área destinada à espécie  $e$  sob regime de manejo  $m$ , ocorrendo o plantio no período  $pi$ , ou seja, para que qualquer variável  $x_{e,m,pi}$  seja valorizada, é necessário, que a variável binária correspondente  $y_{e,m,pi}$  receba valor 1. Tal restrição foi obtida impondo-se que a diferença entre  $y_{e,m,pi}$  e  $x_{e,m,pi}$  seja maior ou igual a zero.

$$y_{e,m,pi} - x_{e,m,pi} \geq 0 \quad \forall e \in (CEE \cup CEN); m \in CM_e; pi \in CP \quad (5.8)$$

- Limitação de área destinada à espécie

É viável estipular uma porcentagem de área mínima e de área máxima que uma determinada espécie possa ocupar. Desta forma as restrições a seguir impõem que  $x_{e,m,pi}$  deve ser maior ou igual a  $A \min_e$  e menor ou igual a  $A \max_e$ .

$$x_{e,m,pi} \leq A \max_e, \quad \forall e \in (CEE \cup CEN); m \in CM_e; pi \in CP \quad (5.9)$$

$$x_{e,m,pi} \geq y_{e,m,pi} \cdot A \min_e, \quad \forall e \in (CEE \cup CEN); m \in CM_e; pi \in CP \quad (5.10)$$

➤ Receita líquida mínima por período

A solução do modelo encontra a cada período uma receita líquida. Para cada um dos períodos deve-se ter o somatório do valor presente dos fluxos correspondentes para cada espécie multiplicado pela área destinada a tais manejos maior ou igual a  $L \min_p$ .

$$\sum_{e \in (CEE \cup CEN)} \sum_{m \in CM_e} \sum_{pi \in CP} vp_{e,m,p,pi} \cdot x_{e,m,pi} \geq L \min_p \quad \forall p \in CP \quad (5.11)$$

➤ Número médio de plantas em 1 hectare por período

É desejável que a solução do modelo garanta uma quantidade mínima de mudas por hectare a cada período. Os regimes de manejo considerados indicam a quantidade de plantas existentes em um hectare caso sejam selecionados a cada período. O produto da porcentagem de uma espécie  $e$ , sob regime de manejo  $m$  no período  $pi$  pela quantidade de mudas num hectare pelo regime de manejo  $m$  no período  $p$ , resulta na quantidade de mudas da espécie  $e$  em um hectare. O somatório, da quantidade de mudas de cada uma das espécies por período, deve ser maior ou igual a um valor  $M \min_p$  em cada período do planejamento.

$$\sum_{e \in (CEE \cup CEN)} \sum_{m \in CM_e} \sum_{pi \in CP} q_{e,m,p,pi} \cdot x_{e,m,pi} \geq M \min_p \quad \forall p \in CP \quad (5.12)$$

O modelo também pode apontar solução para os casos em que não for desejável a inclusão das espécies exóticas na solução. Para tanto, basta considerar o conjunto  $CEE$  como um conjunto vazio, e omitir as informações dadas pelos parâmetros a respeito das espécies exóticas.

O plantio de cada espécie, dentre pioneiras, secundárias e clímax, somente pode ocorrer em alguns períodos. Existe um período a partir do qual cada espécie pode iniciar seu ciclo econômico. Por exemplo, se a quarta espécie só puder ser plantada a partir do quinto

período, então, as variáveis  $x_{4,m,pi}$ , e  $y_{4,m,pi}$  com  $pi = 1, \dots, 4$  não podem receber valor, ou seja, devem permanecer zeradas. Também há espécies que não podem ser plantadas a partir de certo período. Por exemplo, se a primeira espécie só puder iniciar seu ciclo econômico no primeiro e segundo períodos, as variáveis  $x_{1,m,pi}$ , e  $y_{1,m,pi}$  com  $pi > 2$  não recebem valor. Assim, tais variáveis não estão sendo consideradas, ou seja, não aparecem no modelo.

O último ano de plantio permitido para uma espécie exótica é 2018. Para cumprir essa restrição as variáveis em que o índice referente ao período indicam o plantio das exóticas após o ano de 2018 foram suprimidas das restrições e da função objetivo. Por exemplo, se o modelo for escrito no ano de 2011, as variáveis  $x_{e,m,pi}$ , e  $y_{e,m,pi}$  correspondentes as espécies exóticas poderão ter o seu índice  $pi$  variando de 1 até 7, não apresentando nenhum índice  $pi > 7$ . Os parâmetros  $a_{e,m,p,pi}$  é que garantem estas condições para o modelo.

Vale ressaltar que as espécies secundárias têm o seu plantio a partir do quinto período do planejamento, enquanto as clímax, a partir do décimo segundo. Já as espécies pioneiras devem iniciar o seu ciclo econômico apenas no primeiro e segundos períodos do planejamento. Como toda espécie exótica também é pioneira, os períodos iniciais  $pi \leq 2$  são os únicos válidos para estas desde que respeitem a restrição de último plantio permitido em 2018.

## 6. IMPLEMENTAÇÃO

A implementação computacional do modelo apresentado até a obtenção do resultado foi feita em três fases: construção do modelo, resolução do modelo e estruturação dos resultados. Para o desenvolvimento dessa pesquisa foi utilizado um computador Dell, modelo VOSTRO V1510, processador Intel Core2 Duo – 1,8 Ghz com 4 GB de memória RAM e HD de 140 GB.

### 6.1. CONSTRUÇÃO DO MODELO

Para escrever as restrições e função objetivo do modelo, foi desenvolvido um *software* usando-se a linguagem de programação do MATLAB. Tal *software* foi reconhecido pelo MATLAB como uma função. Para obter o modelo, a função foi ativada com o envio de parâmetros. Alguns parâmetros foram enviados diretamente, ao passo que outros, o próprio *software* construiu com base nas informações fornecidas. Os dados de entrada necessários para ativar a função e obter os modelos foram organizados em matrizes, vetores e escalares. A obtenção dos parâmetros não informados diretamente pelos dados de entrada está detalhada na seção 6.1.2.

#### 6.1.1. Dados de entrada do programa

##### 6.1.1.1. Matrizes

Parte dos dados serão colocados nas seguintes matrizes.

- fluxo* - os fluxos de caixa para cada espécie e cada manejo serão colocados nesta matriz. Os fluxos das espécies exóticas devem aparecer antes das nativas. Se uma espécie admitir mais de um regime de manejo, os fluxos de caixa referentes a cada um deles devem aparecer em sequência, ou seja, não se deve ter um fluxo de outro regime de manejo entre estes.
- planta* - nesta matriz são colocadas as quantidades de mudas de cada espécie. Cada linha indica a quantidade de mudas para uma espécie *e* em um hectare, sob o regime

de manejo  $m$  no período  $p$ . Também deve ser respeitada a ordem, isto é, primeiro as espécies exóticas, depois as nativas. Se uma destas espécies apresentar mais de um regime de manejo, não deve ter quantidades referentes ao regime de manejo de outras espécies entre estas. De acordo com os desbastes realizados, o número de mudas de cada espécie difere em cada período. Quando o produto florestal obtido são os frutos ou as folhas, o número de plantas por hectare permanecerá o mesmo em cada um dos períodos do ciclo econômico.

#### 6.1.1.2. Vetores

Outra parte dos dados será enviada ao programa por intermédio de vetores. Este primeiro grupo de vetores tem ordem igual ao número de espécies.

- agrupamento* - dados de quantidades de regimes de manejos para cada espécie;
- sucessao* - dados do período a partir do qual pode ser realizado o plantio de cada espécie;
- $A_{min}$  - dados para porcentagem de área mínima destinada a cada espécie. Cada uma das suas componentes corresponde ao parâmetro  $A_{min_e}$  do modelo;
- $A_{max}$  - dados para porcentagem de área máxima destinada a cada espécie. Cada uma das suas componentes corresponde ao parâmetro  $A_{max_e}$  do modelo.

O segundo grupo de vetores tem ordem igual ao número de períodos do planejamento.

- $B_{min}$  - dados para quantidade mínima de espécies por período de planejamento. Cada uma das suas componentes corresponde ao parâmetro  $B_{min_p}$  do modelo;
- $L_{min}$  - dados da receita líquida mínima desejada para o fluxo de caixa por período. Cada uma das suas componentes corresponde ao parâmetro  $L_{min_p}$  do modelo.

A quantidade de mudas  $M_{min_p}$  por hectare no período é fixa e estipulada por Lei no valor de 200. Este parâmetro do modelo não foi considerado como um dado de entrada, mas foi diretamente escrito nas linhas de código do programa.

Tem-se ainda um vetor com ordem igual ao número de regimes de manejo possíveis.

- ciclo* - dados para a quantidade de períodos do ciclo econômico de cada espécie e regime de manejo florestal.

#### 6.1.1.3. Escalares

Os valores escalares a serem informados ao programa foram:

- periodo* - quantidade total de períodos de planejamento;
- exoticas* - quantidade de espécies exóticas;
- taxa* - taxa utilizada para cálculo do *vp* e *VPL*;
- anoini* - quantidade de períodos, dados em anos, até o ano de início do planejamento.

### 6.1.2. Cálculos preliminares

Nesta seção será feita a explicação de como alguns parâmetros necessários à construção do modelo, porém não informados ao programa diretamente pelos dados de entrada, foram obtidos. Estes parâmetros calculados foram armazenados em matrizes e escalares, descritos a seguir.

#### 6.1.2.1. Matrizes

- $vp_{e,m,p,pi}$  - com a matriz *fluxo* e os escalares *taxa* e *anoini* são calculados os valores presentes dos regimes para cada período *p* dos manejos iniciando em cada um dos períodos de planejamento *pi*. Com o auxílio do vetor *ciclo* tais valores são armazenados em uma matriz, que obedece a mesma ordem dos manejos que a matriz *fluxo*. Assim, são obtidos os valores para a construção da restrição de receita líquida por período.
- $q_{e,m,p,pi}$  - a matriz *planta* é utilizada para obtenção do número de plantas por hectare nos períodos *p* para cada regime de manejo *m* iniciando o ciclo econômico em um dos períodos *pi*. Tais valores, armazenados em uma matriz com o auxílio do vetor *ciclo*, são utilizados para a construção das restrições de número mínimo de plantas por hectare em um período.
- $a_{e,m,p,pi}$  - com a matriz *fluxo* e o vetor *ciclo* é possível obter esta matriz. É dado valor 1 para  $a_{e,m,p,pi}$ , se *p* for um período do ciclo econômico da espécie *e* sob regime de manejo *m* iniciando o seu plantio no período *pi* e zero em caso contrário. Isso para cada um dos regimes de manejo, na ordem em que estes estão na matriz *fluxo*.
- $VPL_{e,m,pi}$  - com a matriz *fluxo* e os escalares *taxa* e *anoini*, o *software* calcula o Valor Presente Líquido (VPL) de todos os regimes de manejo para os ciclos econômicos com data inicial em cada um dos períodos de planejamento *pi*. Assim são gerados os coeficientes da função objetivo.



### 6.1.2.2. Escalares

A quantidade total de espécies é um escalar e foi obtida a partir do número de colunas de qualquer um dos vetores que possuem ordem igual ao número de espécies.

Para melhor entendimento sobre a construção do modelo, será detalhado a seguir um exemplo piloto.

### 6.1.3. Exemplo de um modelo piloto

Este modelo irá utilizar três espécies pioneiras, sendo uma exótica com um regime de manejo, e duas nativas, uma com dois e outra com um regime de manejo, respectivamente. O QUADRO 3 mostra os sistemas de manejo para cada uma das espécies, indicando a quantidade de mudas por hectare no período inicial do ciclo econômico, os anos em que devem ser feitas as colheitas de madeira e as unidades remanescentes de plantas em um hectare após a realização de cada uma das colheitas.

Sistemas de Manejo								
Tipo da Espécie	Regime de Manejo	Unidades por hectare	Colheitas de madeira					
			ano	un. rem.	ano	un. rem.	ano	un. rem.
Exótica 1	1	500	3	300	4	0		
Nativa 1	1	720	2	500	4	200	5	0
Nativa 1	2	840	2	530	4	270	5	0
Nativa 2	1	432	2	0				

QUADRO 3: SISTEMAS DE MANEJO DO MODELO PILOTO

FONTE: A AUTORA (2010)

O QUADRO 4 mostra os fluxos de caixa. Nestes fluxos são consideradas as receitas líquidas de cada um dos períodos dos sistemas de manejo apresentados no QUADRO 3. Por exemplo, a espécie exótica, tem saldo negativo no primeiro período devido a gastos com o preparo do solo, insumo, mão-de-obra para plantio entre outros. No segundo período, pode haver algum gasto com a manutenção da plantação. No terceiro período é feita uma colheita, então é obtido saldo positivo, considerando a diferença entre o lucro com a venda do produto e os gastos com a manutenção da plantação. Cálculos semelhantes a este são feitos para os outros períodos. É importante ressaltar que está se considerando que no mesmo período em que é feita a colheita, o produto florestal é comercializado.

A construção do modelo foi feita com o objetivo de obter-se o maior Valor Presente Líquido (VPL). Foi considerada a combinação dos diversos regimes de manejo para um total de períodos de planejamento de 6 anos. Ainda que o regime de maior ciclo econômico seja de

5 anos, o planejamento neste exemplo foi feito para um período de 6 anos afim de ilustrar possíveis situações.

Fluxos de Caixa							
Tipo da Espécie	Regime de Manejo	Períodos					
		1	2	3	4	5	6
Exótica 1	1	-R\$ 323,18	-R\$ 34,50	R\$ 930,00	R\$ 1.200,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
Nativa 1	1	-R\$ 289,13	R\$ 350,00	-R\$ 15,00	R\$ 890,00	R\$ 600,00	R\$ 0,00
Nativa 1	2	-R\$ 312,67	R\$ 410,00	-R\$ 15,00	R\$ 1.054,00	R\$ 734,00	R\$ 0,00
Nativa 2	1	-R\$ 219,56	R\$ 633,14	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00

QUADRO 4: FLUXOS DE CAIXA DO EXEMPLO PILOTO

FONTE: A AUTORA (2010)

#### 6.1.3.1. Dados de entrada

A partir das informações fornecidas, são identificados os seguintes dados de entrada a serem enviados ao programa para que este realize a construção do modelo.

##### 6.1.3.1.1. Matrizes

Com a QUADRO 4 dos fluxos de caixa é obtida a matriz fluxo

$$fluxo = \begin{bmatrix} -323.18 & -34.50 & 930.00 & 1200.00 & 0.00 & 0.00 \\ -289.13 & 350.00 & -15.00 & 890.00 & 600.00 & 0.00 \\ -312.67 & 410.00 & -15.00 & 1054.00 & 734.00 & 0.00 \\ -219.56 & 633.14 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$$

Do QUADRO 3 extrai-se a matriz *planta*. Vale lembrar que a última coluna da tabela equivale ao sexto período do planejamento.

$$planta = \begin{bmatrix} 500 & 500 & 500 & 300 & 0 & 0 \\ 720 & 720 & 500 & 500 & 200 & 0 \\ 840 & 840 & 530 & 530 & 270 & 0 \\ 432 & 432 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

##### 6.1.3.1.2. Vetores

$$sucessao = [1 \quad 1 \quad 1]$$

- todas as espécies podem ter o seu plantio a partir do primeiro período de planejamento;

$$ciclo = [4 \quad 5 \quad 5 \quad 2]$$

- número de períodos do ciclo econômico para cada espécie e manejos;

- $agrupamento = [1 \ 2 \ 1]$  - um manejo para a primeira espécie, que é exótica, dois para a primeira nativa e um para a segunda;
- $A_{min} = [0.1 \ 0.1 \ 0.1]$  - a área mínima a ser ocupada por cada espécie se for selecionada será de 10%;
- $A_{max} = [0.6 \ 0.6 \ 0.6]$  - a área máxima será de 60%;
- $B_{min} = [2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2]$  - número de espécies mínimo permitido é 2 por período;
- $M_{min} = [50 \ 50 \ 50 \ 50 \ 50 \ 50]$  - quantidade mínima de mudas por hectare.
- $L_{min} = [-1500.00 \ -1500.00 \ -1500.00 \ -1500.00 \ -1500.00 \ -1500.00]$  - receita líquida mínima por período.

#### 6.1.3.1.3. Escalares

- $periodo = 6$  - planejamento está considerando 6 períodos;
- $exoticas = 1$  - quantidade de espécies exóticas;
- $taxa = 0.07$  - taxa de atualização dos valores por período;
- $anoini = 0$  - o primeiro período de planejamento será o ano atual.

#### 6.1.3.2. Obtenção dos demais parâmetros do modelo

A explicação de como o programa determinou os demais parâmetros necessários à construção do modelo, e que não foram obtidos diretamente dos dados de entrada do programa, é feita a seguir.

A quantidade de espécies é obtida do número de colunas de qualquer um dos vetores dos dados de entrada: *agrupamento*, *sucessao*,  $A_{min}$  ou  $A_{max}$ . Dessa forma para esse exemplo, tem-se o total de espécies igual a 3.

A matriz auxiliar a seguir, foi obtida a partir da matriz fluxo. Para cada linha da matriz fluxo é feito um ciclo com período inicial em cada um dos períodos do planejamento. Desta forma se obterá uma matriz com número de linhas igual ao produto do número de linhas da matriz fluxo pelo número de períodos. O número de colunas será igual ao número de períodos.

$$auxiliar = \begin{bmatrix} -323.18 & -34.50 & 930.00 & 1200.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & -323.18 & -34.50 & 930.00 & 1200.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & -323.18 & -34.50 & 930.00 & 1200.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & -323.18 & -34.50 & 930.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & -323.18 & -34.50 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & -323.18 \\ -289.18 & 350.00 & -15.00 & 1054.00 & 734.00 & 0.00 \\ 0.00 & -289.18 & 350.00 & -15.00 & 1054.00 & 734.00 \\ \dots & & & & & \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & -219.56 \end{bmatrix}$$

Descapitalizando cada um dos valores desta matriz auxiliar e utilizando os dados de entrada *taxa* e *anoini*, é possível obter o valor presente dos regimes de manejo para cada período, mostrados na matriz a seguir:

$$vp_{e,m,p,pi} = \begin{bmatrix} -323.18 & -32.24 & 812.30 & 976.56 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & -302.04 & -30.13 & 759.16 & 915.47 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & -282.28 & -28.16 & 709.49 & 855.58 \\ \dots & & & & & \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & -167.50 & 451.42 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & -156.54 \end{bmatrix}$$

É feita então a soma dos valores das linhas da matriz  $vp_{e,m,p,pi}$  para obter-se o Valor Presente Líquido (VPL) referente ao plantio da espécie *e* sob regime de manejo *m* iniciando o ciclo econômico no período *pi*. Cada soma foi colocada na matriz  $VPL_{e,m,pi}$  mostrada a seguir. Observando que todas as espécies são pioneiras, elas devem iniciar o ciclo econômico no primeiro e segundo períodos apenas. Assim, as únicas variáveis que poderão receber valor não nulo são aquelas com índice  $pi = 1,2$ . Para desconsiderar as variáveis com  $pi \neq 1,2$ , o coeficiente para estas na função objetivo foi dado por zero, e tais variáveis foram suprimidas das restrições. Na matriz do VPL, as linhas referem-se às espécies, e as colunas referenciam o período de plantio, portanto, a partir da terceira coluna observam-se zeros.

$$VPL_{e,m,pi} = \begin{bmatrix} 1436.43 & 1342.46 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 1209.11 & 1130.01 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 1477.75 & 1381.07 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 372.16 & 633.14 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$$

Para obter a quantidade de plantas a cada período  $p$  do planejamento, com início do ciclo econômico nos possíveis períodos  $pi$  para cada regime de manejo, um procedimento semelhante ao que é feito para o cálculo da matriz auxiliar, é realizado com base na matriz  $planta$ . Obtém-se a matriz:

$$q_{e,m,p,pi} = \begin{bmatrix} 500 & 500 & 500 & 300 & 0 & 0 \\ 0 & 500 & 500 & 500 & 300 & 0 \\ 0 & 0 & 500 & 500 & 500 & 300 \\ & & & \dots & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 432 & 432 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 432 \end{bmatrix}$$

Finalmente, é construída a matriz  $a_{e,m,p,pi}$  com mesma ordem que a matriz auxiliar. O valor dos componentes será igual a 1 se o correspondente na matriz auxiliar é diferente de zero. E será igual a zero para todos os outros componentes.

$$a_{e,m,p,pi} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ & & & \dots & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Como a resolução do modelo será feita pelo aplicativo LINGO, gera-se o modelo usando a rotina desenvolvida no *software* do MATLAB na forma de interpretação do LINGO.

O modelo obtido para o exemplo piloto está detalhado a seguir:

```
MODEL:
!Função Objetivo;;
MAX= +1436.4325 * X_1_1_1+1342.4603 * X_1_1_2+1209.1135 * X_2_1_1+1130.0126 * X_2_1_2+1477.749
* X_2_2_1+1381.0739 * X_2_2_2+372.1596 * X_3_1_1+347.8127 * X_3_1_2;
!Restrição 1 - Quantidade de Espécies por Período;;
+Y_1_1_1+Y_2_1_1+Y_2_2_1+Y_3_1_1>=2;
+Y_1_1_1+Y_1_1_2+Y_2_1_1+Y_2_1_2+Y_2_2_1+Y_2_2_2+Y_3_1_1+Y_3_1_2>=2;
+Y_1_1_1+Y_1_1_2+Y_2_1_1+Y_2_1_2+Y_2_2_1+Y_2_2_2+Y_3_1_2>=2;
+Y_1_1_1+Y_1_1_2+Y_2_1_1+Y_2_1_2+Y_2_2_1+Y_2_2_2>=2;
+Y_1_1_2+Y_2_1_1+Y_2_1_2+Y_2_2_1+Y_2_2_2>=2;
+Y_2_1_2+Y_2_2_2>=2;
!Restrição 2 - Área Total;;
+X_1_1_1+X_2_1_1+X_2_2_1+X_3_1_1<=1;
+X_1_1_1+X_1_1_2+X_2_1_1+X_2_1_2+X_2_2_1+X_2_2_2+X_3_1_1+X_3_1_2<=1;
```

```

+X_1_1_1+X_1_1_2+X_2_1_1+X_2_1_2+X_2_2_1+X_2_2_2+X_3_1_2<=1;
+X_1_1_1+X_1_1_2+X_2_1_1+X_2_1_2+X_2_2_1+X_2_2_2<=1;
+X_1_1_2+X_2_1_1+X_2_1_2+X_2_2_1+X_2_2_2<=1;
+X_2_1_2+X_2_2_2<=1;
!Restrição 4 - Manejos Distintos para a Mesma Espécie;;
+Y_2_1_1+Y_2_2_1<=1;
+Y_2_1_1+Y_2_1_2+Y_2_2_1+Y_2_2_2<=1;
+Y_2_1_2+Y_2_2_2<=1;
!Restrição 5 - A Mesma Exótica Não Pode ser Seleccionada Mais de uma Vez;;
!Restrição 6 - A Seleção de um Regime de Manejo Quando este Não Findou o seu Ciclo Econômico
Não é Permitida;;
+Y_1_1_1<=1;
+Y_1_1_1+Y_1_1_2<=1;
+Y_1_1_2<=1;
+Y_2_1_1<=1;
+Y_2_1_1+Y_2_1_2<=1;
+Y_2_1_2<=1;
+Y_2_2_1<=1;
+Y_2_2_1+Y_2_2_2<=1;
+Y_2_2_2<=1;
+Y_3_1_1<=1;
+Y_3_1_1+Y_3_1_2<=1;
+Y_3_1_2<=1;
!Restrição 7 - A Variável x é Valorizada se e Apenas se y Binária Valer 1;;
Y_1_1_1-X_1_1_1>=0;
Y_1_1_2-X_1_1_2>=0;
Y_2_1_1-X_2_1_1>=0;
Y_2_1_2-X_2_1_2>=0;
Y_2_2_1-X_2_2_1>=0;
Y_2_2_2-X_2_2_2>=0;
Y_3_1_1-X_3_1_1>=0;
Y_3_1_2-X_3_1_2>=0;
!Restrição 8 - Limitação de Área Mínima e Área Máxima Destinada à Espécie;;
X_1_1_1<=0.6;
X_1_1_1>=0.1*Y_1_1_1;
X_1_1_2<=0.6;
X_1_1_2>=0.1*Y_1_1_2;
X_2_1_1<=0.6;
X_2_1_1>=0.1*Y_2_1_1;
X_2_1_2<=0.6;
X_2_1_2>=0.1*Y_2_1_2;
X_2_2_1<=0.6;
X_2_2_1>=0.1*Y_2_2_1;
X_2_2_2<=0.6;
X_2_2_2>=0.1*Y_2_2_2;
X_3_1_1<=0.6;
X_3_1_1>=0.1*Y_3_1_1;
X_3_1_2<=0.6;
X_3_1_2>=0.1*Y_3_1_2;
!Restrição 9 - Receita Líquida Mínima por Período;;
+-323.18 * X_1_1_1+-289.13 * X_2_1_1+-312.67 * X_2_2_1+-219.56 * X_3_1_1>=-1500;
+-32.243 * X_1_1_1+-302.0374 * X_1_1_2+327.1028 * X_2_1_1+-270.215 * X_2_1_2+383.1776 *
X_2_2_1+-292.215 * X_2_2_2+591.7196 * X_3_1_1+-205.1963 * X_3_1_2>=-1500;
+812.298 * X_1_1_1+-30.1336 * X_1_1_2+-13.1016 * X_2_1_1+305.7036 * X_2_1_2+-13.1016 *
X_2_2_1+358.1099 * X_2_2_2+553.009 * X_3_1_2>=-1500;
+979.5575 * X_1_1_1+759.157 * X_1_1_2+726.5051 * X_2_1_1+-12.2445 * X_2_1_2+860.378 *
X_2_2_1+-12.2445 * X_2_2_2>=-1500;
+915.4743 * X_1_1_2+457.7371 * X_2_1_1+678.9767 * X_2_1_2+559.9651 * X_2_2_1+804.0916 *
X_2_2_2>=-1500;
+427.7917 * X_2_1_2+523.3319 * X_2_2_2>=-1500;
!Restrição 10 - Número Mínimo de Plantas por Hectare no Período;;
+500 * X_1_1_1+720 * X_2_1_1+840 * X_2_2_1+432 * X_3_1_1>=200;
+500 * X_1_1_1+500 * X_1_1_2+720 * X_2_1_1+720 * X_2_1_2+840 * X_2_2_1+840 * X_2_2_2+432 *
X_3_1_1+432 * X_3_1_2>=200;
+500 * X_1_1_1+500 * X_1_1_2+500 * X_2_1_1+720 * X_2_1_2+530 * X_2_2_1+840 * X_2_2_2+432 *
X_3_1_2>=200;
+300 * X_1_1_1+500 * X_1_1_2+500 * X_2_1_1+500 * X_2_1_2+530 * X_2_2_1+530 * X_2_2_2>=200;
+300 * X_1_1_2+200 * X_2_1_1+500 * X_2_1_2+270 * X_2_2_1+530 * X_2_2_2>=200;
+200 * X_2_1_2+270 * X_2_2_2>=200;
!Restrição 11 - Y é Variável Binária;;
@BIN(Y_1_1_1);
@BIN(Y_1_1_2);
@BIN(Y_2_1_1);
@BIN(Y_2_1_2);
@BIN(Y_2_2_1);
@BIN(Y_2_2_2);
@BIN(Y_3_1_1);

```

```
@BIN(Y_3_1_2);  
END
```

## 6.2. RESOLUÇÃO DO MODELO

As soluções para os modelos gerados pelo software desenvolvido no MATLAB foram obtidas pelo aplicativo LINGO 12, no qual estão implementados os métodos de resolução de Pesquisa Operacional.

## 6.3. ESTRUTURAÇÃO DOS RESULTADOS

De posse da solução apontada pelo LINGO, os resultados foram então colocados em planilhas no aplicativo *Microsoft Excel*. Essa ação facilitou a visualização dos períodos de plantio de cada espécie com seus ciclos econômicos, do número de espécies presentes na reserva, das porcentagens de área da Reserva Legal utilizadas, da quantidade de plantas por hectare e dos valores presentes líquidos a cada período.

## 7. RESULTADOS E CONCLUSÕES

### 7.1. RESULTADOS

Para obtenção dos resultados, foram considerados três casos distintos quanto à exigência da quantidade de espécies na área de Reserva Legal no decorrer dos períodos.

CASO I - exigiu apenas 5 espécies na ARL em cada um dos 30 períodos, ou seja, 5 espécies nativas.

CASO II - procurou assemelhar-se mais com a realidade de uma floresta, considerando a inclusão de uma nova espécie a cada 5 anos. No período inicial são exigidas 5 espécies, no quinto período, 6 espécies, a partir do décimo período 7 espécies, no décimo quinto, 8 espécies, no vigésimo, 9 espécies, e finalmente, no vigésimo quinto período 10 espécies. Por questões ambientais, esse modelo, é o mais adequado.

CASO III – uma combinação semelhante a do CASO II foi considerada. A diferença é que a inclusão de uma nova espécie foi feita a cada 7 anos. Ou seja, a reserva inicia com 5 espécies, a partir do sétimo ano são exigidas 6 espécies, a partir do décimo quarto, são exigidas 8 espécies, e a partir do vigésimo primeiro ano, 8 espécies.

Para cada um dos casos, foi considerada a possibilidade da presença ou não de uma espécie exótica, conforme a imposição da Lei para a recuperação da Reserva Legal. Alguns modelos permitem a presença da exótica, ao passo que em outros, as exóticas foram suprimidas da modelagem. Estes constituem-se em dois sub-casos para os CASOS I, II e III. Nos modelos que permitem a presença da exótica, a exigência de número de espécies refere-se à quantidade de espécies nativas, sendo as exóticas computadas além do mínimo. Por exemplo, se em um período estiver sendo cumprida a exigência de 8 espécies, então, deverão ser plantadas no mínimo 8 nativas. Se uma exótica for acrescentada, serão então 9 espécies distintas.

Para cada um dos três casos foram variadas as quantidades de ocupação de área por um espécie. Os parâmetros utilizados para área máxima foram de 20%, 30%, 40%, e 50% do total da reserva, e para a porcentagem mínima de ocupação de uma espécie foram de 5%. Para cada um dos casos foram gerados 4 modelos que impuseram restrições variando-se o parâmetro relativo a área máxima a ser ocupada por uma espécie. Como o parâmetro relativo



à área mínima é único, será o mesmo em todos os modelos. Sendo assim, foram gerados 24 modelos, 12 deles considerando a possibilidade do plantio da exótica, e 12 em que as espécies exóticas foram omitidas da modelagem. Os 24 modelos tiveram como período inicial o ano atual, um total de períodos de planejamento de 30 anos e taxa de descapitalização de 10%.

O tempo computacional gasto para a redação de cada um dos 24 modelos pelo programa do MATLAB variou entre 8 e 10 segundos. O aplicativo LINGO 12 apresentou a solução com tempo computacional de 2 a 3 segundos, no máximo.

O sistema de manejo que apresentou maior valor de VPL foi o do CASO I, com área máxima permitida de 50% para cada espécie, incluindo uma espécie exótica. A seguir, o detalhamento desse resultado é apresentado.

Os valores encontrados para as variáveis referentes à porcentagem da área a ser ocupada foram:

$$\begin{aligned}
 x_{2,1,1} &= 0,5; \\
 x_{3,2,1} &= 0,05; \\
 x_{4,1,5} &= 0,25; \\
 x_{5,1,30} &= 0,05; \\
 x_{6,3,1} &= 0,05; \\
 x_{8,1,8} &= 0,1; \\
 x_{9,1,1} &= 0,05; \\
 x_{10,1,1} &= 0,05; \\
 x_{14,1,1} &= 0,05; \\
 x_{15,1,29} &= 0,05.
 \end{aligned}$$

O valor para os demais  $x_{e,m,pi}$ ,  $e \in (CEE \cup CEN)$ ,  $m \in CM$  e  $pi \in CP$  foi zero.

Os valores para as variáveis  $x_{e,m,pi}$  com  $e \in (CEE \cup CEN)$ ,  $m \in CM$  e  $pi \in CP$  indicam o período do plantio. A nível de exemplificação temos que o resultado  $x_{8,1,8} = 0,1$ , indica que 10% da área da reserva legal deverá ser ocupada a partir do oitavo período do planejamento pela oitava espécie, com o primeiro regime de manejo desta espécie.

O QUADRO 5, está apresentando os períodos do ciclo econômico que devem ser ocupados por cada uma das espécies. O regime de manejo selecionado para cada espécie está indicado na coluna M. Tais regimes respeitam a numeração do QUADRO 2. Ainda, no que se refere aos resultados para o modelo que gerou o maior valor de VPL, vários quadros foram confeccionados.

CICLOS ECONÔMICOS DAS ESPÉCIES NA RESERVA LEGAL																																	
Espécie	M	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30		
Eucalipto																																	
Nogueira	1																																
Bracatinga	2																																
Louro	1																																
Erva mate	1																																
Araucária	3																																
Imbuia																																	
Jabuticaba	1																																
G. serrana	1																																
L. branco	1																																
C. preta																																	
A. branco																																	
C. branca																																	
Maricá	1																																
Canjarana	1																																
Grápia																																	

QUADRO 5: CICLOS ECONÔMICOS DAS ESPÉCIES NA RESERVA LEGAL  
FONTE: A AUTORA (2010)

PORCENTAGEM DA ÁREA OCUPADA POR PERÍODO																																	
Espécie	M	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30		
Eucalipto																																	
Nogueira	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5		
Bracatinga	2	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05																									
Louro	1					0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25			
Erva mate	1																														0,05		
Araucária	3	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05		
Imbuia																																	
Jabuticaba	1								0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1		
G. serrana	1	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05		
L. branco	1	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05		
C. preta																																	
A. branco																																	
C. branca																																	
Maricá	1	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05																									
Canjarana	1																														0,05		
Grápia																															0,05		
Total		0,75	0,75	0,75	0,75	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,8	

QUADRO 6: PORCENTAGEM DA ÁREA OCUPADA POR PERÍODO  
FONTE: A AUTORA (2010)

O QUADRO 6 apresenta os percentuais de área de cada uma das espécies, na ocupação da Reserva Legal. Na última linha é possível observar a porcentagem de área total da reserva utilizada a cada período.

Os regimes de manejo apontados pela solução apresentam os fluxos de caixa descritos no QUADRO 7.

Espécie	Manejo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nogueira	1	-3.566,46	-476,95	-288,15	556,25	2.956,25	5.356,25	9.196,25	6.556,25	13.516,25	12.708,45
Bracatinga	2	-1.958,40	-408,15	162,33	-283,75	-283,75	-283,75	8.343,53	0,00	0,00	0,00
Louro	1	-5.107,62	-526,95	-283,75	-483,75	-283,75	-483,75	-283,75	7.448,75	-283,75	-283,75
Erva mate	1	-1.178,28	-666,95	-631,27	-193,72	25,05	218,86	359,50	437,64	506,39	537,65
Araucária	3	-2.461,62	-666,95	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75
Jabuticaba	1	-2.610,06	-422,55	-335,35	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75
G. serrana	1	-8.910,06	-422,55	-335,35	-283,75	316,25	516,25	1.116,25	1.316,25	2.176,25	2.176,25
L. branco	1	-2.220,92	-422,55	-335,35	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75
Maricá	1	-733,42	-422,55	474,65	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	2.326,25	0,00	0,00
Canjarana	1	-510,06	-422,55	-335,35	-283,75	-283,75	-283,75	1.811,68	-283,75	-283,75	-283,75

Espécie	Manejo	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Nogueira	1	12.804,45	13.044,45	13.044,45	13.524,45	13.764,45	14.004,45	14.244,45	14.244,45	14.244,45	14.244,45
Bracatinga	2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Louro	1	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75
Erva mate	1	553,27	559,52	565,78	568,90	568,90	562,65	562,65	562,65	562,65	562,65
Araucária	3	-283,75	5.996,11	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75
Jabuticaba	1	-283,75	13.556,25	13.556,25	13.556,25	13.556,25	13.556,25	13.556,25	13.556,25	13.556,25	13.556,25
G. serrana	1	2.176,25	1.016,25	1.016,25	1.016,25	1.016,25	1.016,25	1.016,25	1.016,25	1.016,25	1.016,25
L. branco	1	-283,75	1.538,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75
Maricá	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Canjarana	1	-283,75	3.660,95	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	6.199,33

Espécie	Manejo	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Nogueira	1	14.244,45	14.244,45	14.244,45	14.244,45	14.244,45	14.244,45	14.244,45	14.244,45	14.244,45	14.244,45
Bracatinga	2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Louro	1	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	330.278,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Erva mate	1	562,65	562,65	562,65	562,65	562,65	562,65	562,65	562,65	562,65	562,65
Araucária	3	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	197.376,18
Jabuticaba	1	13.556,25	13.556,25	13.556,25	13.556,25	13.556,25	13.556,25	13.556,25	13.556,25	13.556,25	13.556,25
G. serrana	1	1.016,25	1.016,25	1.016,25	1.016,25	1.016,25	1.016,25	1.016,25	1.016,25	1.016,25	1.016,25
L. branco	1	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	7.816,25	0,00	0,00
Maricá	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Canjarana	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

QUADRO 7: FLUXOS DE CAIXA DOS REGIMES DE MANEJO DA SOLUÇÃO DO MODELO  
FONTE: A AUTORA (2010)

Conhecendo-se os fluxos, e atualizando seus valores com taxa anual de 10%, foi possível a obtenção da contribuição de cada espécie quanto à receita líquida proporcional a fração de área que está ocupando. Dessa forma obteve-se a receita líquida atualizada de um hectare estimada para cada período do planejamento, caso a solução seja implementada. Esse resultado está registrado no QUADRO 8. Para melhor visualização da variação dos valores a cada período, construiu-se o gráfico do QUADRO 9.

O QUADRO 10 apresenta a quantidade de plantas por hectare para cada espécie sob cada regime de manejo selecionado.

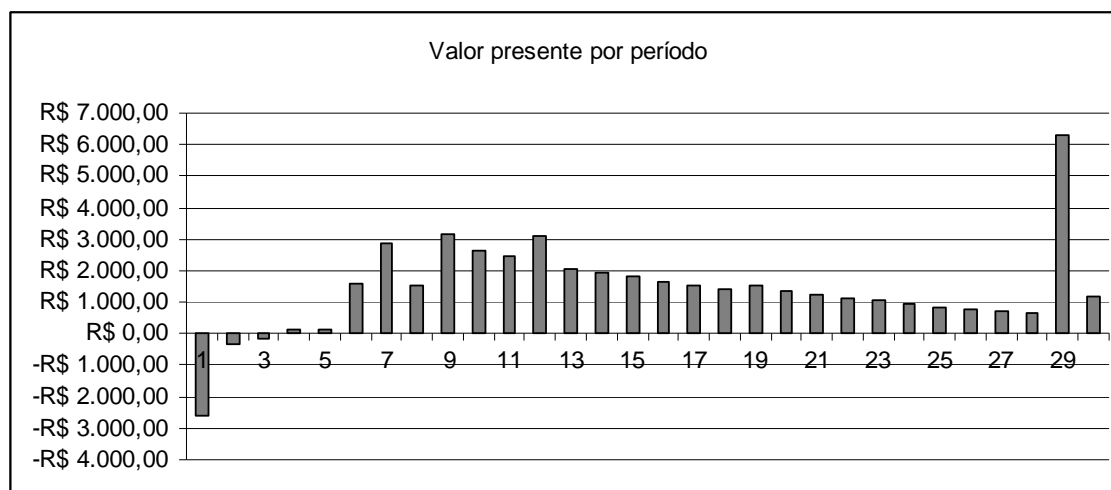


Espécie	Manejo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Nogueira	1	-1.783,23	-216,80	-119,07	208,96	1.009,58	1.662,90	2.595,52	1.682,20	3.152,72	2.694,81
Bracatinga	2	-97,92	-18,55	6,71	-10,66	-9,69	-8,81	235,49	0,00	0,00	0,00
Louro	1	0,00	0,00	0,00	0,00	-872,14	-81,80	-40,04	-62,06	-33,09	-51,29
Erva mate	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Araucária	3	-123,08	-30,32	-11,73	-10,66	-9,69	-8,81	-8,01	-7,28	-6,62	-6,02
Jabuticaba	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-133,94	-19,71	-14,22
G. serrana	1	-445,50	-19,21	-13,86	-10,66	10,80	16,03	31,50	33,77	50,76	46,15
L. branco	1	-111,05	-19,21	-13,86	-10,66	-9,69	-8,81	-8,01	-7,28	-6,62	-6,02
Maricá	1	-36,67	-19,21	19,61	-10,66	-9,69	-8,81	65,66	0,00	0,00	0,00
Canjarana	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
VP/periódodo		-2.597,45	-323,28	-132,19	155,66	109,48	1.561,90	2.872,11	1.505,41	3.137,43	2.663,41

Espécie	Manejo	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Nogueira	1	2.468,33	2.286,00	2.078,18	1.958,78	1.812,30	1.676,28	1.550,00	1.409,09	1.280,99	1.164,54
Bracatinga	2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Louro	1	-27,35	652,69	-22,60	-20,55	-18,68	-16,98	-15,44	-14,03	-12,76	-11,60
Erva mate	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Araucária	3	-5,47	105,08	-4,52	-4,11	-3,74	-3,40	-3,09	-2,81	-2,55	-2,32
Jabuticaba	1	-10,94	-9,95	-9,04	-8,22	-7,47	-6,79	-6,18	-5,61	243,82	221,66
G. serrana	1	41,95	17,81	16,19	14,72	13,38	12,16	11,06	10,05	9,14	8,31
L. branco	1	-5,47	26,97	-4,52	-4,11	-3,74	-3,40	-3,09	-2,81	-2,55	-2,32
Maricá	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Canjarana	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
VP/periódodo		2.461,06	3.078,60	2.053,69	1.936,51	1.792,06	1.657,87	1.533,27	1.393,88	1.516,09	1.378,27

Espécie	Manejo	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	VP/espécie
Nogueira	1	1.058,67	962,43	874,94	795,40	723,09	657,35	597,59	543,27	493,88	448,98	35.727,70
Bracatinga	2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	96,56
Louro	1	-10,54	-9,59	-8,71	-7,92	-7,20	-6,55	-5,95	-5,41	5.725,66	0,00	5.016,05
Erva mate	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-3,71	-3,71
Araucária	3	-2,11	-1,92	-1,74	-1,58	-1,44	-1,31	-1,19	-1,08	-0,98	622,12	459,64
Jabuticaba	1	201,51	183,19	166,53	151,39	137,63	125,12	113,74	103,40	94,00	85,46	1.595,38
G. serrana	1	7,55	6,87	6,24	5,67	5,16	4,69	4,26	3,88	3,52	3,20	-94,39
L. branco	1	-2,11	-1,92	-1,74	-1,58	-1,44	-1,31	-1,19	29,81	0,00	0,00	-187,71
Maricá	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,23
Canjarana	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,77	-1,33	-3,10
VP/periódodo		1.252,97	1.139,06	1.035,51	941,37	855,79	778,00	707,27	673,86	6.314,31	1.154,72	42.606,65

QUADRO 8: VALOR PRESENTE POR ESPÉCIE E POR PERÍODO DE PLANEJAMENTO  
FONTE: A AUTORA (2010)



Espécie	Manejo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nogueira	1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Bracatinga	2	3333	3333	3333	1667	1667	1667	1667	0	0	0
Louro	1	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111	277	277
Erva mate	1	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111
Araucária	3	1667	1667	1667	1667	1667	1667	1667	1667	1667	1667
Jabuticaba	1	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
G. serrana	1	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
L. branco	1	833	833	833	833	833	833	833	833	833	833
Maricá	1	2500	2500	2500	1500	1500	1500	1500	0	0	0
Canjarana	1	1667	1667	1667	1667	1667	1667	1667	1250	1250	1250

Espécie	Manejo	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Nogueira	1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Bracatinga	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Louro	1	277	277	277	277	277	277	277	277	277	277
Erva mate	1	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111
Araucária	3	1667	1667	990	990	990	990	990	990	990	990
Jabuticaba	1	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
G. serrana	1	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
L. branco	1	833	833	420	420	420	420	420	420	420	420
Maricá	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Canjarana	1	1250	1250	625	625	625	625	625	625	625	625

Espécie	Manejo	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Nogueira	1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Bracatinga	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Louro	1	277	277	277	277	277	0	0	0	0	0
Erva mate	1	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111
Araucária	3	990	990	990	990	990	990	990	990	990	990
Jabuticaba	1	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
G. serrana	1	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
L. branco	1	420	420	420	420	420	420	420	420	0	0
Maricá	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Canjarana	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

QUADRO 10: QUANTIDADE DE PLANTAS/HA DE CADA ESPÉCIE SOB REGIMES SELECIONADOS  
FONTE: A AUTORA (2010)

As porcentagens destinadas a cada uma das espécies nos períodos de planejamento, conforme a solução do modelo, possibilitaram a obtenção da contribuição de cada espécie quanto ao número de plantas por hectare no período. O registro desse resultado encontra-se no QUADRO 11.

Quadros semelhantes aos apresentados para o modelo de maior *VPL* foram elaborados para cada uma das 24 soluções obtidas para os 24 modelos construídos. O valor para cada uma das variáveis  $x_{e,m,pi}$ , correspondente à porcentagem de área destinada à espécie em cada solução, é apresentado no QUADRO 12. O manejo selecionado para cada espécie e o período de início do ciclo econômico da espécie na ARL, para cada uma das 24 soluções está no QUADRO 13.

Por fim, um resumo dos principais resultados obtidos a partir dos modelos pode ser visualizado no QUADRO 14.

QUANTIDADE DE PLANTAS POR PERÍODO EM UM HECTARE																															
Espécie	M	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Eucalipto																															
Nogueira	1	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Bracatinga	2	167	167	83	83	83	83	83	83	278	278	278	278	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69
Louro	1					278	278	278	278	278	278	278	278	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	
Erva mate	1																														56
Araucária	3	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Imbuia																															
Jabuticaba	1								40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
G. serrana	1	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
L. branco	1	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
C. preta																															
A. branco																															
C. branca																															
Manicá	1	125	125	75	75	75	75	75																							
Canjarana	1																													83	83
Grápia																															
Total		487	487	487	353	631	631	631	513	513	513	513	513	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	312	298

QUADRO 11: QUANTIDADE DE PLANTAS POR PERÍODO EM UM HECTARE

FONTE: A AUTORA (2010)





Área permitida		PERÍODO INICIAL DE CADA ESPÉCIE NA ÁREA DE RESERVA LEGAL																									
		Eucalipto			Nogueira			Bracatinga			Louro		Erva-mate		Araucária		Imbuia	Jabuticaba	G. Serrana	L. Branco	C. Preta	A. Branco	C. Branca	Maricá	Canjara	Grábia	
	Mín.	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	1	2	1	2	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
CASO I	Sem	5%				1																					
	Com	20%																									
	5%	30%				1																					
	Exótica	40%				1																					
	5%	50%				1																					
CASO II	Sem	5%				1																					
	5%	20%																									
	Com	30%				1																					
	Exótica	40%				1																					
	5%	50%				1																					
CASO III	Sem	5%																									
	5%	20%																									
	Com	30%				1																					
	Exótica	40%				1																					
	5%	50%				1																					
CASO IV	Sem	5%																									
	5%	20%																									
	Com	30%				1																					
	Exótica	40%				1																					
	5%	50%				1																					
CASO V	Sem	5%																									
	5%	20%																									
	Com	30%				1																					
	Exótica	40%				1																					
	5%	50%				1																					
CASO VI	Sem	5%																									
	5%	20%																									
	Com	30%				1																					
	Exótica	40%				1																					
	5%	50%				1																					

QUADRO 13: PERÍODO INICIAL DA ESPÉCIE NA ÁREA DE RESERVA LEGAL  
 FONTE: A AUTORA (2010)



		Área permitida		VPL por hectare	Número de plantas no hectare			Área ocupada		Investimento Inicial
		Mínima	Máxima		Menor	Período	Maior	Menor	Período	
CASO I	Com Exótica	5%	20%	R\$ 25.210,46	394	28	884	0,6	1 a 4	R\$ 1.581,76
		5%	30%	R\$ 32.380,19	333	4	562	0,55	1 a 4	R\$ 1.884,16
		5%	40%	R\$ 37.715,42	333	20 a 27	492	0,65	1 a 4	R\$ 1.976,24
	Sem Exótica	5%	50%	R\$ 42.606,65	259	13 a 28	631	0,75	1 a 4	R\$ 2.597,45
		5%	20%	R\$ 16.010,36	560	28 a 30	1524	0,55	29 a 30	R\$ 2.965,05
		5%	30%	R\$ 23.312,29	420	20	993	0,5	28 a 30	R\$ 3.663,41
CASO II	Com Exótica	5%	40%	R\$ 28.425,50	420	20	993	0,6	28 a 30	R\$ 3.641,00
		5%	50%	R\$ 30.440,38	411	26 a 27	894	0,7	26 a 30	R\$ 2.794,74
		5%	20%	R\$ 23.980,72	402	19	792	0,5	1 a 4	R\$ 1.625,43
	Sem Exótica	5%	30%	R\$ 29.319,79	391	19	656	0,6	1 a 4	R\$ 1.982,08
		5%	40%	R\$ 34.059,01	361	19	643	0,7	1 a 4	R\$ 2.338,73
		5%	50%	R\$ 38.798,23	331	18 a 19	653	0,8	1 a 4	R\$ 2.640,91
CASO III	Com Exótica	5%	20%	R\$ 15.388,34	553	21 a 23	1524	0,85	8 a 9	R\$ 937,14
		5%	30%	R\$ 21.311,20	510	21 a 23	1265	0,75	26 a 30	R\$ 3.536,63
		5%	40%	R\$ 22.293,30	534	13 a 14	1327	0,85	8 a 9	R\$ 2.938,74
	Sem Exótica	5%	50%	R\$ 23.275,41	534	21 a 28	1256	0,85	8 a 9	R\$ 3.037,02
		5%	20%	R\$ 24.598,88	463	23 a 24	876	0,55	1 a 4	R\$ 1.773,67
		5%	30%	R\$ 31.225,04	333	4	648	0,55	1 a 4	R\$ 1.884,16
CASO III	Com Exótica	5%	40%	R\$ 36.164,21	322	23 a 24	542	0,65	1 a 4	R\$ 2.240,81
		5%	50%	R\$ 40.903,43	332	23 a 24	552	0,75	1 a 4	R\$ 2.597,45
		5%	20%	R\$ 15.846,30	616	24 a 25	1469	0,65	28 a 30	R\$ 2.906,14
	Sem Exótica	5%	30%	R\$ 22.418,65	510	24 a 27	1176	0,65	26 a 30	R\$ 3.364,24
		5%	40%	R\$ 25.466,31	519	15 a 18	1049	0,75	26 a 30	R\$ 3.228,15
		5%	50%	R\$ 26.448,41	531	15 a 18	978	0,85	26 a 30	R\$ 2.978,40

QUADRO 14: RESUMO DAS SOLUÇÕES DOS MODELOS

FONTE: A AUTORA (2010)

### 7.1.1. Análise dos resultados

Nas soluções dos modelos observa-se que quando uma determinada espécie é selecionada, ocorre com o regime de manejo de maior lucratividade. Isso deve-se ao fato de o modelo prever que a mesma espécie não pode estar com dois regimes de manejos distintos durante o mesmo período. Logo, se uma espécie é selecionada mais de uma vez ao longo dos períodos de planejamento, deve ser com o mesmo regime de manejo. A seleção dos regimes de manejo menos lucrativos geralmente ocorre nos períodos finais do planejamento por apresentarem menor investimento inicial. Na maioria das soluções a área de Reserva Legal é ocupada parcialmente, nos primeiros três ou quatro períodos. Isso ocorre pelo fato de não ter sido considerado nenhum regime de manejo com ciclo econômico de 3 ou 4 anos. Também, deve-se ao fato de ocorrer menor investimento inicial. Para os períodos seguintes à esses primeiros, em que a área não é exatamente igual a 1, isso não vem a ser um problema, pois as florestas mais desenvolvidas apresentam menor densidade, ou seja, são menos povoadas.

Os resultados de alguns modelos serão discutidos. O maior *VPL* para todos os modelos ocorreu para o CASO I com porcentagem máxima permitida para uma espécie de 50% da área da Reserva Legal, e com inclusão de uma espécie exótica. O programa responde apontando a nogueira, espécie exótica e com maior *VPL*, para ocupar metade da área da Reserva. Para os casos em que não foi permitida a presença da exótica, o maior *VPL* ocorreu quando o mínimo exigido foram de 5 espécies distintas e permissão de até 50% da área com uma única espécie. A espécie nativa de maior *VPL* selecionada para ocupar 50% da área foi a jabuticaba. No APENDICE A estão os QUADROS com os resultados para este caso. A diferença no lucro em um hectare mostradas nesses dois resultados revela que a contribuição das espécies exóticas é muito significativa.

Se for observado que este cenário contempla apenas 5 espécies nativas, ainda que permitido por Lei, este número de espécies não reflete os processos ecológicos que ocorrem em uma floresta natural. A tendência é que o número de espécies aumente. Nesse sentido, pode-se considerar que um dos sistemas interessantes apontados como solução, foi no CASO III, para o qual é permitida que uma espécie ocupe metade da área sem inclusão da exótica. O investimento inicial para esse sistema foi próximo a outros investimentos feitos na modalidade sem exótica, porém a solução deste apresentou um *VPL* maior que os demais. O detalhamento para tal solução está no APENDICE B.

## 7.2. CONCLUSÕES

Conhecer os dados de um total de 16 espécies possibilita a obtenção das soluções de diversos modelos matemáticos que comprovaram a eficácia da modelagem desenvolvida.

Com relação a utilização do aplicativo MATLAB, afirma-se que o mesmo mostrou-se eficaz na redação dos modelos. Também, pode-se salientar que efetuou ações como construção de matrizes de grande dimensão e utilização de fórmulas para o cálculo de vários parâmetros de entrada do modelo de forma eficiente, em tempo computacional desprezível. Ainda, a estruturação dos modelos por esse aplicativo permite a variação do ano de início da simulação. Vale lembrar que esse ano é referente ao primeiro período para o qual deseja-se fazer o estudo da viabilidade econômica do sistema de manejo florestal. É possível também a geração de vários modelos, o que permite a obtenção de opções de planejamentos distintos para as mais variadas situações.

No que se refere aos modelos em PLIM, pode-se observar que ocorrerem restrições redundantes. Como a retirada das mesmas não mostra-se viável e mesmo com essas restrições obtêm-se tempo computacional aceitável para a resolução pelo aplicativo LINGO, então elas podem ser mantidas no modelo.

Dentre as vantagens da análise dos resultados no aplicativo *Microsoft Excel* está a de se ter uma estimativa da receita líquida anual para o plano de manejo sugerido como solução e obter uma descrição da situação da reserva em cada um dos períodos do planejamento.

Foi possível apresentar as soluções dos modelos de forma sucinta através de quadros. As três soluções mais interessantes do ponto de vista econômico também foram detalhadas. A modelagem matemática deu-se com um modelo de Programação Linear Inteiro Misto e cumpriu o seu objetivo de descrever a área de Reserva Legal de forma que os resultados obtidos podem ser implementados.

### 7.2.1. Sugestões para trabalhos futuros

Uma primeira sugestão seria a de impedir o aparecimento de território ocioso nos primeiros períodos do planejamento com a utilização de sistemas de manejo de ciclo econômico de 3 ou 4 períodos na construção do modelo. Outra alternativa seria fazer um estudo que considere as culturas anuais, pois estas são permitidas por lei para os 3 primeiros períodos de implantação da Reserva Legal.

Outra sugestão seria com relação à redução no número de variáveis do problema, retirando-se para cada uma das espécies, os regimes de manejo menos lucrativos, deixando apenas o de maior retorno financeiro.

Pode-se também fazer alterações no *software* implementado pelo MATLAB com relação à redação do modelo para que restrições redundantes não sejam mais redigidas. Existe ainda a opção de modelar-se o problema usando os recursos do aplicativo LINGO.

Finalmente, é possível fazer-se um levantamento dos indicadores econômicos das soluções de diversos modelos, a fim de analisar economicamente a implementação dos mesmos.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, E. L., **Introdução à Pesquisa Operacional: Métodos e Modelos para a Análise de Decisões**. 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004
- ARENALES, M., ARMENTANO V., MORABITO R., YANASSE H., **Pesquisa Operacional**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007
- BARTOSIEVICZ, F.N.; **Planejamento de Redes de Distribuição de Energia Elétrica via Programação Linear Convexa**. Dissertação de mestrado. Métodos numéricos em engenharia, área de concentração programação matemática. UFPR, 2008.
- BRASIL. Lei nº 4.771/1965. Instituiu o Código Florestal. **Diário Oficial**. Brasília, DF: 1965
- BRASIL. Lei nº 8.171/1991. Dispõe sobre a política agrícola. **Diário Oficial**. Brasília, DF: 1991.
- BRASIL. Decreto nº 6.541/2008. Dispõe sobre as infrações e sanções administrativas ao Meio Ambiente estabelece o processo administrativo federal para apuração destas infrações, e dá outras providências. **Diário Oficial**. Brasília, DF: 2008.
- BRONSON R., **Pesquisa Operacional**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1985.
- CAIXETA-FILHO, J. V., **Pesquisa Operacional: Técnicas de Otimização Aplicadas a Sistemas Agroindustriais**. 2 ed., São Paulo: Atlas, 2004.
- CARVALHO, P.E.R. **Espécies Arbóreas Brasileiras**. Vol 1. Coleção Espécies Arbóreas Brasileiras. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo: Embrapa Florestas, 2003.
- DAILY, **Gretchen C. Nature's services: societal dependence o natural ecossistems**. Washington, DC: Island Press, 1997
- EHRlich, P. J., **Pesquisa Operacional: curso introdutório**. São Paulo: Atlas, 1988.
- EMBRAPA. **Espécies Florestais Brasileiras**. Disponível em: [http://www.cnpf.embrapa.br/pesquisa/efb/index\\_especies.htm](http://www.cnpf.embrapa.br/pesquisa/efb/index_especies.htm)
- FALCÃO, A.O.; BORGES, J.G. **Designing an evolution program for solving integer forest management scheduling models: an application in Portugal**. Forest science, v.47, n.2, p. 158-168, 2001.
- FALCÃO, A.O.; BORGES, J.G. **Heurísticas para a investigação de níveis estratégico e operacional da gestão florestal em problemas de grande dimensão**. Scientia Florestalis, n. 63, p. 94-102, 2003.
- FALCÃO, A.DUNAS, **A growth model for the National Forest of Leiria**. Ifru workshop empirical and process based models for forest tree and stand growth simulation, Oeiras, 1997.

FIGUEIREDO, E.O.; SCOLFORO, J.R.S.; OLIVEIRA, O.D. **Estimativa do Percentual de Casca e do Fator de Forma em Povoamentos Jovens de Teca (*Tectona Grandis L.f.*)**, Comunicado Técnico 165, Rio Branco, 2005

FLOR, H. M. **Florestas Tropicais, como intervir sem devastar**. Coleção Brasil Agrícola. São Paulo: Ícone Editora, 1985.

GALETI, P.A. **Conservação do Solo, Reflorestamento, Clima**. 2 ed. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1973.

GOLDBARG, M. C., LUNA, H. P. L., **Otimização Combinatória e Programação Linear: Modelos e Algoritmos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2000.

GONÇALVES, A.A., ABREU, C.C., MACEDO, J. **A Reserva Legal Florestal no Paraná: alternativas e benefícios quanto a sua implementação e uso econômico**. *Ambiência – Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais*. v.3n.1 p.125-140, 2007

HADLEY G., **Programação Linear**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois S.A., 1982.

HILLIER, F. S., LIEBERMAN, G. J., **Introdução à Pesquisa Operacional**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1988.

IAPAR. **Instituto Agrônomo do Paraná**. Disponível em: <http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=195>.

INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ. Portaria nº 233/2004. SISLEG. Curitiba, PR: 2004

INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ. Portaria nº 157/2005. Normatiza o uso de espécies arbóreas exóticas na Reserva Legal. Curitiba, PR: 2005

**Inventário Florestal do Pinheiro no Sul do Brasil**. Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná. Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal. Curitiba: 1978.

JOELS, L.M. **Reserva Legal e Gestão da Propriedade Rural: um Estudo Comparativo da Atitude e Comportamento de Agricultores Orgânicos e Convencionais do Distrito Federal**. Planeta Orgânico, 2002.

JOHNSON, K. N.; SCHEURMAN, H. L. **Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives: discussion e synthesis**. *Forest science monography*, n. 18, p. 1-31, 1977.

LACHTERMACHER, G., **Pesquisa operacional na tomada de decisões: modelagem em Excel**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

LEUSCHNER, W.A. **Introdution to Forest Resource Management**. New York, John Wiley & Sons, 1984, p.290.

MIRANDA, M. **Áreas de Preservação Permanente e Reserva Legal: o que dizem as leis para a agricultura familiar?** Londrina: IAPAR, 2009

MURTY, K. G., **Linear and combinatorial programming**, New York: Wiley, 1976.

PARANÁ. Lei nº 11054/95. Dispõe sobre a Lei Florestal do Estado. **Diário Oficial** nº 4425. Curitiba, PR: 1995.

PARANÁ. Decreto nº 378/99. Instituiu o SISLEG. **Diário Oficial** nº 5446. Curitiba, PR: 1999.

PARANÁ. Decreto nº 3.320/99. Regulamenta o SISLEG. **Diário Oficial** nº 6769. Curitiba, PR: 2004.

PUCCINI A. L., **Introdução à Programação Linear**, Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico SA, 1972.

RODRIGUES, F.L.; LEITE, H.G; SANTOS, H.N.; SOUZA, A.L. **Solução de problemas de planejamento florestal com restrições de inteireza utilizando Busca Tabu**. Revista *Árvore*. v.27, n.05, p.701-713, 2003

RODRIGUES, F.L.; LEITE, H.G; SANTOS, H.N.; SOUZA, A.L.; RIBEIRO, C.A.A.S. **Metaheurística Simulated Annealing para solução de problemas de planejamento florestal com restrições de integridade**. Revista *Árvore*. v.28, n.02, p.247-256, 2004

RODRIGUES, F.L.; LEITE, H.G.; SANTOS, H.N.; SOUZA, A.L.; SILVA, G.F. **Metaheurística algoritmo genético para solução de problemas de planejamento florestal com restrições de integridade**. Revista *Árvore*. v.28, n.2, p.233-245, 2004.

RODRIGUES, F.L.; SILVA, G.F.; LEITE, H.G.; XAVIER, A.C.; PEZZOPANE, J.E.M. **Um modelo de regulação florestal e suas implicações na formulação e solução de problemas com restrições de recobrimento**. Revista *árvore*. v.30, n.05, p.769-778, 2006.

RODRIGUES, L.C.E. **Gerenciamento da Produção Florestal**. Documentos Florestais. v.13, p.1-41, 1991

RODRIGUES, L.C.E.; MOREIRA, R.M.; **Gerenciamento de Florestas de *Eucalyptus* com modelos de programação linear**. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais. v.6, n.19, p.1-15, 1989.

RODRIGUEZ, L.C.E. **Técnicas Quantitativas para a Gestão de Florestas Plantadas. Ciências Florestais**. Escola Superior de Agricultura ‘Luiz de Queirós’ Universidade de São Paulo. 2005.

SECRETARIA DO ESTADO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. Resolução nº 045/2008. Instituiu critérios, normas, procedimentos e conceitos aplicáveis ao uso de espécies exóticas na recuperação da Reserva Legal. Curitiba, PR: 2008.

SILVA, G.F.; PIASSI, L.C.; MORA R.; MARTINS, L.T.; TEIXEIRA, A.F.; JUNIOR, A.A.B. **Metaheurística algoritmo genético na solução de modelos de planejamento florestal**. Revista Brasileira de Ciências Agrárias. v.4, n.2, p.160-166, 2009.

SILVA, E. M., SILVA E. M., GONÇALVES, V., MUROLO, A. C., **Pesquisa Operacional: Programação Linear e Simulação**. São Paulo: Atlas, 1998.

SOARES, C.P.B.; NETO, F.P.; SOUZA, A.L. **Dendometria e Inventário Florestal**. Viçosa: UFV, 2006.

SOUZA, A.; CLEMENTE, A. **Decisões financeiras e análise de investimentos: fundamentos, técnicas e aplicações**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

VARGAS, F.M.; **Regimes de manejo e fluxos de caixa**. IAPAR, Pato Branco, 2010.

VIVEIRO ALMEIDA. **Plantas Nativas e Exóticas**. Disponível em <http://www.viveiroalameda.com.br/mudas.asp>.

WIKIPÉDIA. **Coluna**. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Coluna>

WIKIPÉDIA. **Feijoa**. Disponível em <http://pt.wikipedia.org/wiki/Feijoa>.

WIKIPÉDIA. **Jabuticaba**. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Jabuticaba>

WIKIPÉDIA. **Nogueira-pecã**. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Nogueira-pec%C3%A3>



## APÊNDICES

## APÊNDICE A

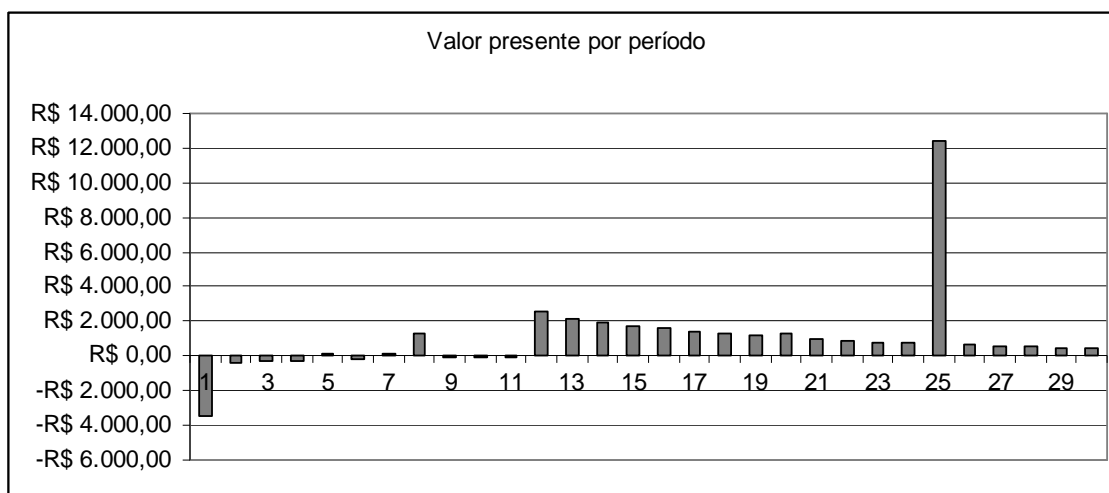
Espécie	Manejo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bracatinga	2	-97,92	-18,55	6,71	-10,66	-9,69	-8,81	235,49	0,00	0,00	0,00
Louro	1	-1.787,67	-167,67	-82,08	-127,21	-67,83	-105,13	-56,06	1.337,84	-46,33	-42,12
Erva-mate	1	-58,91	-30,32	-26,09	-7,28	0,86	6,79	10,15	11,23	11,81	11,40
Araucária	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Jabuticaba	1	-1.305,03	-192,07	-138,57	-106,59	-96,90	-88,09	-80,08	-72,80	-66,19	-60,17
A. branco	1	-198,55	-19,21	-13,86	-10,66	307,91	-8,81	-8,01	-7,28	-6,62	-6,02
Maricá	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Canjarana	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-13,09	-9,86	-7,11
VP/período		-3.448,08	-427,81	-253,89	-262,40	134,34	-204,05	101,48	1.255,89	-117,18	-104,01

Espécie	Manejo	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Bracatinga	2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Louro	1	-38,29	-34,81	-31,64	-28,77	-26,15	-23,77	-21,61	-19,65	-17,86	-16,24
Erva-mate	1	10,67	9,81	9,01	8,24	7,49	6,73	6,12	5,57	5,06	4,60
Araucária	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Jabuticaba	1	-54,70	2.375,69	2.159,72	1.963,38	1.784,89	1.622,63	1.475,12	1.341,02	1.219,11	1.108,28
A. branco	1	-5,47	239,50	-4,52	-4,11	-3,74	-3,40	-3,09	-2,81	-2,55	197,26
Maricá	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Canjarana	1	-5,47	-4,97	-4,52	26,24	-3,74	-3,40	-3,09	-2,81	32,92	-2,32
VP/período		-93,26	2.585,21	2.128,05	1.964,98	1.758,76	1.598,80	1.453,45	1.321,32	1.236,67	1.291,58

Espécie	Manejo	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	VP/espécie
Bracatinga	2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	96,56
Louro	1	-14,76	-13,42	-12,20	-11,09	11.736,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10.281,59
Erva-mate	1	4,18	3,80	3,46	3,14	2,86	2,60	2,36	2,15	1,95	1,77	31,21
Araucária	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-5,22	-2,80	-1,08	-0,98	-0,89	-10,98
Jabuticaba	1	1.007,53	915,93	832,67	756,97	688,15	625,59	568,72	517,02	470,02	427,29	19.598,51
A. branco	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	435,99
Maricá	1	-5,45	-2,85	2,92	-1,58	-1,44	-1,31	9,76	-2,80	-1,47	1,50	-2,73
Canjarana	1	-2,11	-1,92	-1,74	-1,58	-1,44	-1,31	26,01	-1,95	-1,47	-1,06	10,23
VP/período		989,38	901,54	825,09	745,85	12.424,24	620,35	604,05	513,34	468,05	428,61	30.440,38

QUADRO 15: FLUXO DE CAIXA NOS PERÍODOS DE PLANEJAMENTO

FONTE: A AUTORA (2010)



QUADRO 16: VALOR PRESENTE POR PERÍODO DE PLANEJAMENTO

FONTE: A AUTORA (2010)

CICLOS ECONÔMICOS DAS ESPÉCIES NA RESERVA LEGAL																																	
Espécie	M	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30		
Eucalipto																																	
Nogueira																																	
Bracatinga	2																																
Louro	1																																
Erva mate	1																																
Araucária	1																																
Imbuia																																	
Jabuticaba	1																																
G. serrana																																	
L. branco																																	
C. preta																																	
A. branco	1																																
C. branca																																	
Maricá	1																																
Canjarana	1																																
Grápia																																	

QUADRO 17: CICLOS ECONÔMICOS DAS ESPÉCIES NA RESERVA LEGAL

FONTE: A AUTORA (2010)

PORCENTAGEM DA ÁREA OCUPADA POR PERÍODO																																	
Espécie	M	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30		
Eucalipto																																	
Nogueira																																	
Bracatinga	2	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05																									
Louro	1	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35							
Erva mate	1	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05		
Araucária	1																										0,05	0,05	0,05	0,05	0,05		
Imbuia																																	
Jabuticaba	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5		
G. serrana																																	
L. branco																																	
C. preta																																	
A. branco	1	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05												
C. branca																																	
Maricá	1																					0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05		
Canjarana	1								0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05		
Grápia																																	
Total		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	

QUADRO 18: PORCENTAGEM DA ÁREA OCUPADA POR PERÍODO

FONTE: A AUTORA (2010)

QUANTIDADE DE PLANTAS POR PERÍODO EM UM HECTARE																															
Espécie	M	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Eucalipto																															
Nogueira																															
Bracatinga	2	167	167	83	83	83	83	83																							
Louro	1	389	389	389	389	389	389	389	389	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	0	0	0	0	0
Erva mate	1	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56
Araucária	1	0																									50	50	50	50	50
Imbuia	0																														
Jabuticaba	1	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
G. serrana	0																														
L. branco	0																														
C. preta	0																														
A. branco	1	83	83	83	83	83	83	83	63	63	63	63	63	31	31	31	31	31	31	31	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C. branca																						0									
Maricá	1																					125	125	125	75	75	75	75	125	125	125
Canjarana	1								83	83	83	83	83	83	83	63	63	63	63	31	31	31	31	31	31	31	31	31	83	83	83
Grápia																															
Total		894	894	894	811	811	811	811	790	498	498	498	498	467	467	446	446	446	446	446	415	509	509	509	459	459	411	411	513	513	513

QUADRO 19: QUANTIDADE DE PLANTAS POR PERÍODO EM UM HECTARE

FONTE: A AUTORA (2010)



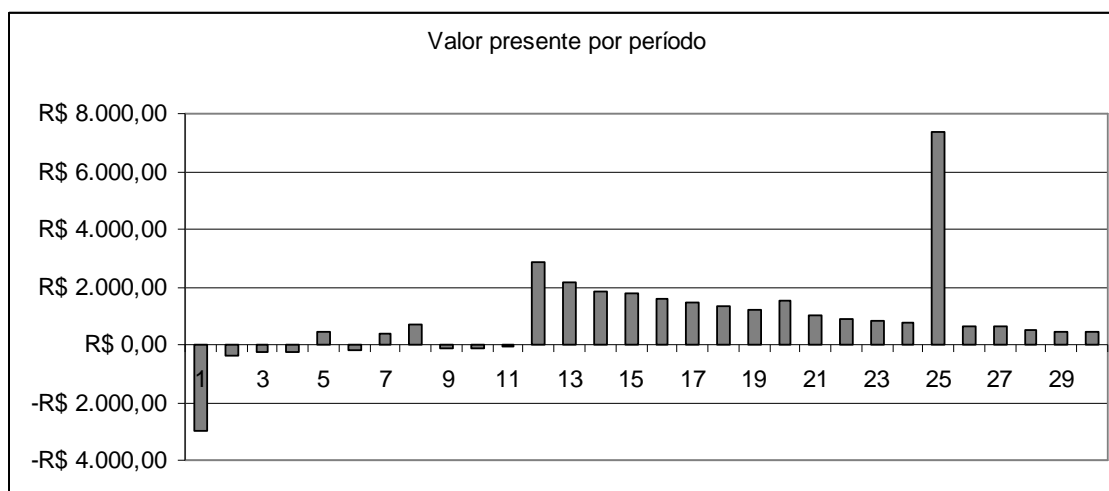
## APÊNDICE B

Espécie	Manejo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bracatinga	2	-195,84	-37,10	13,42	-21,32	-19,38	-17,62	470,97	0,00	0,00	0,00
Louro	1	-1.021,52	-95,81	-46,90	-72,69	-38,76	-60,07	-32,03	764,48	-26,47	-24,07
Enva-mate	1	-58,91	-30,32	-26,09	-7,28	0,86	6,79	10,15	11,23	11,81	11,40
Araucária	3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Jabuticaba	1	-1.305,03	-192,07	-138,57	-106,59	-96,90	-88,09	-80,08	-72,80	-66,19	-60,17
G. serrana	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
L. branco	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
A. branco	1	-397,09	-38,41	-27,71	-21,32	615,82	-17,62	-16,02	-14,56	-13,24	-12,03
C. branca	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Maricá	1	0,00	0,00	0,00	0,00	-25,05	-13,12	13,40	-7,28	-6,62	-6,02
Canjarana	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			-13,09	-9,86	-7,11
VP/período		-2.978,40	-393,71	-225,86	-229,20	436,59	-189,73	366,38	667,97	-110,56	-98,00

Espécie	Manejo	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Bracatinga	2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Louro	1	-21,88	-19,89	-18,08	-16,44	-14,94	-13,59	-12,35	-11,23	-10,21	-9,28
Enva-mate	1	10,67	9,81	9,01	8,24	7,49	6,73	6,12	5,57	5,06	4,60
Araucária	3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-22,14	-5,45
Jabuticaba	1	-54,70	2.375,69	2.159,72	1.963,38	1.784,89	1.622,63	1.475,12	1.341,02	1.219,11	1.108,28
G. serrana	1	0,00	0,00	0,00	-129,05	-5,56	-4,01	-3,09	3,13	4,64	9,13
L. branco	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
A. branco	1	-10,94	478,99	-9,04	-8,22	-7,47	-6,79	-6,18	-5,61	-5,10	394,52
C. branca	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Maricá	1	44,84	-12,85	-6,73	6,87	-3,74	-3,40	-3,09	23,01	0,00	0,00
Canjarana	1	-5,47	-4,97	-4,52	26,24	-3,74	-3,40	-3,09	-2,81	32,92	-2,32
VP/período		-37,48	2.826,77	2.130,36	1.851,03	1.756,93	1.598,18	1.453,45	1.353,07	1.224,28	1.499,48

Espécie	Manejo	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	VP/período
Bracatinga	2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	193,12
Louro	1	-8,44	-7,67	-6,97	-6,34	6.706,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5.875,19
Enva-mate	1	4,18	3,80	3,46	3,14	2,86	2,60	2,36	2,15	1,95	1,77	31,21
Araucária	3	-2,11	-1,92	-1,74	-1,58	-1,44	-1,31	-1,19	-1,08	-0,98	18,90	-22,05
Jabuticaba	1	1.007,53	915,93	832,67	756,97	688,15	625,59	568,72	517,02	470,02	427,29	19.598,51
G. serrana	1	9,78	14,70	13,37	12,15	5,16	4,69	4,26	3,88	3,52	3,20	-50,09
L. branco	1	-16,51	-2,85	-2,06	-1,58	-1,44	-1,31	-1,19	-1,08	-0,98	-0,89	-29,91
A. branco	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	871,98
C. branca	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-22,36	-1,77	-1,28	-0,98	-0,89	-27,29
Maricá	1	-5,45	-2,85	2,92	-1,58	-1,44	-1,31	9,76	-2,80	-1,47	1,50	-2,49
Canjarana	1	-2,11	-1,92	-1,74	-1,58	-1,44	-1,31	26,01	-1,95	-1,47	-1,06	10,23
VP/período		986,88	917,22	839,89	759,59	7.396,76	605,28	606,96	514,86	469,61	449,82	26.448,41

QUADRO 20: FLUXO DE CAIXA NOS PERÍODOS DE PLANEJAMENTO  
FONTE: A AUTORA (2010)



QUADRO 21: VALOR PRESENTE POR PERÍODO DE PLANEJAMENTO  
FONTE: A AUTORA (2010)

CICLOS ECONÔMICOS DAS ESPÉCIES NA RESERVA LEGAL																															
Espécie	M	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Eucalipto																															
Nogueira																															
Bracatinga	2																														
Louro	1																														
Erva mate	1																														
Araucária	3																														
Imbuia																															
Jabuticaba	1																														
G. serrana	1																														
L. branco	1																														
C. preta																															
A. branco	1																														
C. branca	1																														
Maricá	1																														
Canjarana	1																														
Grápia																															

QUADRO 22: CICLOS ECONÔMICOS DAS ESPÉCIES NA RESERVA LEGAL

FONTE: A AUTORA (2010)

PORCENTAGEM DA ÁREA OCUPADA POR PERÍODO																																
Espécie	M	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
Eucalipto																																
Nogueira																																
Bracatinga	2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1																									
Louro	1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2							
Erva mate	1	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
Araucária	3																															
Imbuia																																
Jabuticaba	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
G. serrana	1														0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
L. branco	1																															
C. preta																																
A. branco	1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1											
C. branca	1																										0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Maricá	1					0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05			0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
Canjarana	1								0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
Grápia																																
Total		0,95	0,95	0,95	0,95	1	1	1	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85

QUADRO 23: PORCENTAGEM DA ÁREA OCUPADA POR PERÍODO

FONTE: A AUTORA (2010)

QUANTIDADE DE PLANTAS POR PERÍODO EM UM HECTARE																																
Espécie	M	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
Eucalipto																																
Nogueira																																
Bracatinga	2	333	333	333	167	167	167	167	0																							
Louro	1	222	222	222	222	222	222	222	222	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55						
Erva mate	1	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	
Araucária	3																			83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	
Imbuia																																
Jabuticaba	1	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	
G. serrana	1														20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	
L. branco	1																					42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	
C. preta																																
A. branco	1	167	167	167	167	167	167	167	125	125	125	125	125	63	63	63	63	63	63	63	63											
C. branca	1					0																					83	83	83	83	83	83
Maricá	1					125	125	125	75	75	75	75	125	125	125	75	75	75	75			125	125	125	75	75	75	75	125	125	125	
Canjarana	1								83	83	83	83	83	83	83	63	63	63	63	63	31	31	31	31	31	31	31	31	83	83	83	
Grápia																																
Total		978	978	978	811	936	936	936	761	594	594	594	644	582	602	531	531	531	531	539	508	612	612	612	562	562	590	590	692	692	692	

QUADRO 24: QUANTIDADE DE PLANTAS POR PERÍODO EM UM HECTARE

FONTE: A AUTORA (2010)

**ANEXOS**



## ANEXO A

Regime nº		Espécie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	Eucalipto	-1.746,00	-408,15	-408,15	1.731,15	-403,75	-243,75	-243,75	-243,75	12.434,63	-243,75
2	2	Eucalipto	-1.218,20	-408,15	-408,15	-256,35	1.716,88	-243,75	-243,75	-243,75	12.434,63	-243,75
3	3	Eucalipto	-1.025,06	-408,15	-388,15	-256,35	-383,75	2.115,00	-243,75	-243,75	13.510,50	-243,75
4	1	Nogueira	-3.566,46	-476,95	-288,15	556,25	2.956,25	5.356,25	9.196,25	6.556,25	13.516,25	12.708,45
5	2	Nogueira	-1.979,13	-408,15	191,85	1.276,25	2.908,25	5.644,25	5.644,25	6.364,25	6.796,25	6.332,35
6	1	Bracatinga	-2.570,90	-408,15	274,95	-283,75	-283,75	-283,75	9.100,89	0,00	0,00	0,00
7	2	Bracatinga	-1.958,40	-408,15	162,33	-283,75	-283,75	-283,75	8.343,53	0,00	0,00	0,00
8	3	Bracatinga	-1.468,40	-408,15	106,02	-283,75	-283,75	-283,75	5.387,25	0,00	0,00	0,00
9	1	Louro	-5.107,62	-526,95	-283,75	-483,75	-283,75	-483,75	-283,75	7.448,75	-283,75	-283,75
10	2	Louro	-3.240,95	-526,95	-283,75	-483,75	-283,75	-483,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75
11	1	Erva-mate	-1.178,28	-666,95	-631,27	-193,72	25,05	218,86	359,50	437,64	506,39	537,65
12	1	Araucária	-1.131,62	-666,95	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75
13	2	Araucária	-1.878,28	-666,95	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75
14	3	Araucária	-2.461,62	-666,95	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75
15	1	Imbuia	-9.002,17	-422,55	-335,35	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75
16	1	Jabuticaba	-2.610,06	-422,55	-335,35	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75
17	1	Goiabeira serrana	-8.910,06	-422,55	-335,35	-283,75	316,25	516,25	1.116,25	1.316,25	2.176,25	2.176,25
18	1	Louro-branco	-2.220,92	-422,55	-335,35	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75
19	1	Canela-preta	-3.970,92	-422,55	-335,35	-283,75	-283,75	-283,75	526,25	-283,75	-283,75	-283,75
20	1	Angico-branco	-3.970,92	-422,55	-335,35	-283,75	9.016,25	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75
21	1	Canela-branca	-4.845,92	-422,55	-335,35	-283,75	-283,75	-283,75	762,50	-283,75	-283,75	-283,75
22	1	Maricá	-733,42	-422,55	474,65	-283,75	-283,75	-283,75	2.326,25	0,00	0,00	0,00
23	1	Canjarana	-510,06	-422,55	-335,35	-283,75	-283,75	-283,75	1.811,68	-283,75	-283,75	-283,75
24	1	Grápia	-7.470,92	-422,55	-335,35	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	1.012,25	-283,75	-283,75

Regime nº	Espécie	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	1	Eucalipto	-243,75	-243,75	-243,75	-243,75	-243,75	-243,75	-243,75	-243,75	34.758,00
2	2	Eucalipto	-243,75	-243,75	-243,75	-243,75	-243,75	-243,75	-243,75	-243,75	45.608,25
3	3	Eucalipto	-243,75	-243,75	-243,75	-243,75	-243,75	-243,75	-243,75	-243,75	47.988,75
4	1	Nogueira	12.804,45	13.044,45	13.044,45	13.524,45	13.764,45	14.004,45	14.244,45	14.244,45	14.244,45
5	2	Nogueira	6.380,35	6.500,35	6.500,35	6.740,35	6.860,35	6.980,35	7.100,35	7.100,35	7.100,35
6	1	Bracatinga	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	2	Bracatinga	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	3	Bracatinga	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	1	Louro	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75
10	2	Louro	-283,75	2.611,25	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75
11	1	Erva-mate	553,27	559,52	565,78	568,90	568,90	562,65	562,65	562,65	562,65
12	1	Araucária	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	4.067,52	-283,75	-283,75
13	2	Araucária	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	9.581,95	-283,75	-283,75	-283,75
14	3	Araucária	-283,75	5.996,11	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75
15	1	Imbuia	-283,75	6.068,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75
16	1	Jabuticaba	-283,75	13.556,25	13.556,25	13.556,25	13.556,25	13.556,25	13.556,25	13.556,25	13.556,25
17	1	Goiabeira serrana	2.176,25	1.016,25	1.016,25	1.016,25	1.016,25	1.016,25	1.016,25	1.016,25	1.016,25
18	1	Louro-branco	-283,75	1.538,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75
19	1	Canela-preta	-283,75	492,50	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75
20	1	Angico-branco	-283,75	13.666,25	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	24.128,75
21	1	Canela-branca	-283,75	1.576,25	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	4.366,25
22	1	Maricá	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23	1	Canjarana	-283,75	3.660,95	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	6.199,33
24	1	Grápia	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	4.252,25	-283,75	-283,75	-283,75

QUADRO 25: FLUXOS DE CAIXA PARA TODAS AS ESPÉCIES E REGIMES DE MANEJO

FONTE: VARGAS (2010)

CONTINUA

Regime nº	Espécie	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	1 Eucalipto	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	2 Eucalipto	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	3 Eucalipto	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	1 Nogueira	14.244,45	14.244,45	14.244,45	14.244,45	14.244,45	14.244,45	14.244,45	14.244,45	14.244,45	14.244,45
5	2 Nogueira	7.100,35	7.100,35	7.100,35	7.100,35	7.100,35	7.100,35	7.100,35	7.100,35	7.100,35	7.100,35
6	1 Bracatinga	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	2 Bracatinga	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	3 Bracatinga	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	1 Louro	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	330.278,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	2 Louro	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	12.811,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	1 Erva-mate	562,65	562,65	562,65	562,65	562,65	562,65	562,65	562,65	562,65	562,65
12	1 Araucária	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	30.034,46
13	2 Araucária	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	89.557,81
14	3 Araucária	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	197.376,18
15	1 Imbuia	-243,75	-243,75	-243,75	-243,75	-243,75	-243,75	-243,75	6.356,25	0,00	0,00
16	1 Jabuticaba	13.556,25	13.556,25	13.556,25	13.556,25	13.556,25	13.556,25	13.556,25	13.556,25	13.556,25	13.556,25
17	1 Goiabeira serrana	1.016,25	1.016,25	1.016,25	1.016,25	1.016,25	1.016,25	1.016,25	1.016,25	1.016,25	1.016,25
18	1 Louro-branco	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	7.816,25	0,00	0,00
19	1 Canela-preta	-283,75	-283,75	-283,75	4.306,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	1 Angico-branco	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21	1 Canela-branca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22	1 Maricá	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23	1 Canjarana	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
24	1 Grápia	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	-283,75	13.324,25

QUADRO 25: FLUXOS DE CAIXA PARA TODAS AS ESPÉCIES E REGIMES DE MANEJO

FONTE: VARGAS (2010)

CONCLUSÃO

## ANEXO B

Regime nº	Espécie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	Eucalipto	3333	3333	3333	3333	670	670	670	670	270
2	2	Eucalipto	1667	1667	1667	1667	550	550	550	550	220
3	3	Eucalipto	1111	1111	1111	1111	1111	370	370	370	150
4	1	Nogueira	100	100	100	100	100	100	100	100	100
5	2	Nogueira	44	44	44	44	44	44	44	44	44
6	1	Bracatinga	5000	5000	5000	3333	3333	3333	3333	0	0
7	2	Bracatinga	3333	3333	3333	1667	1667	1667	1667	0	0
8	3	Bracatinga	2000	2000	2000	1111	1111	1111	1111	0	0
9	1	Louro	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111	277	277
10	2	Louro	667	667	667	667	667	667	667	667	667
11	1	Erva-mate	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111
12	1	Araucária	400	400	400	400	400	400	400	400	400
13	2	Araucária	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111
14	3	Araucária	1667	1667	1667	1667	1667	1667	1667	1667	1667
15	1	Imbuia	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250
16	1	Jabuticaba	400	400	400	400	400	400	400	400	400
17	1	Goiabeira serrana	400	400	400	400	400	400	400	400	400
18	1	Louro-branco	833	833	833	833	833	833	833	833	833
19	1	Canela-preta	1667	1667	1667	1667	1667	1667	1250	1250	1250
20	1	Angico-branco	1667	1667	1667	1667	1667	1667	1250	1250	1250
21	1	Canela-branca	1667	1667	1667	1667	1667	1667	1250	1250	1250
22	1	Maricá	2500	2500	2500	1500	1500	1500	0	0	0
23	1	Canjarana	1667	1667	1667	1667	1667	1667	1250	1250	1250
24	1	Grápia	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111	834	834

Regime nº	Espécie	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	1	Eucalipto	270	270	270	270	270	270	270	270	270
2	2	Eucalipto	220	220	220	220	220	220	220	220	220
3	3	Eucalipto	150	150	150	150	150	150	150	150	150
4	1	Nogueira	100	100	100	100	100	100	100	100	100
5	2	Nogueira	44	44	44	44	44	44	44	44	44
6	1	Bracatinga	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	2	Bracatinga	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	3	Bracatinga	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	1	Louro	277	277	277	277	277	277	277	277	277
10	2	Louro	667	667	277	277	277	277	277	277	277
11	1	Erva-mate	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111
12	1	Araucária	400	400	400	400	400	400	400	240	240
13	2	Araucária	1111	1111	1111	1111	1111	820	820	820	820
14	3	Araucária	1667	1667	990	990	990	990	990	990	990
15	1	Imbuia	1250	1250	840	840	840	840	840	840	840
16	1	Jabuticaba	400	400	400	400	400	400	400	400	400
17	1	Goiabeira serrana	400	400	400	400	400	400	400	400	400
18	1	Louro-branco	833	833	420	420	420	420	420	420	420
19	1	Canela-preta	1250	1250	625	625	625	625	625	625	625
20	1	Angico-branco	1250	1250	625	625	625	625	625	625	625
21	1	Canela-branca	1250	1250	625	625	625	625	625	625	625
22	1	Maricá	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	1	Canjarana	1250	1250	625	625	625	625	625	625	625
24	1	Grápia	834	834	834	834	834	555	555	555	555

QUADRO 26: NÚMERO DE PLANTAS PARA TODAS AS ESPÉCIES E REGIMES DE MANEJO

FONTE: VARGAS (2010)

CONTINUA

Regime nº	Espécie	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	1	Eucalipto	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	2	Eucalipto	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3	Eucalipto	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1	Nogueira	100	100	100	100	100	100	100	100	100
5	2	Nogueira	44	44	44	44	44	44	44	44	44
6	1	Bracatinga	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	2	Bracatinga	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	3	Bracatinga	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	1	Louro	277	277	277	277	277	0	0	0	0
10	2	Louro	277	277	277	277	277	0	0	0	0
11	1	Erva-mate	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111
12	1	Araucária	240	240	240	240	240	240	240	240	240
13	2	Araucária	820	820	820	820	820	820	820	820	820
14	3	Araucária	990	990	990	990	990	990	990	990	990
15	1	Imbuia	840	840	840	840	840	840	840	0	0
16	1	Jabuticaba	400	400	400	400	400	400	400	400	400
17	1	Goiabeira serrana	400	400	400	400	400	400	400	400	400
18	1	Louro-branco	420	420	420	420	420	420	420	0	0
19	1	Canela-preta	625	625	625	625	0	0	0	0	0
20	1	Angico-branco	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	1	Canela-branca	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	1	Maricá	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	1	Canjarana	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	1	Grápia	555	555	555	555	555	555	555	555	555

QUADRO 26: NÚMERO DE PLANTAS PARA TODAS AS ESPÉCIES E REGIMES DE MANEJO

FONTE: VARGAS (2010)

CONCLUSÃO